



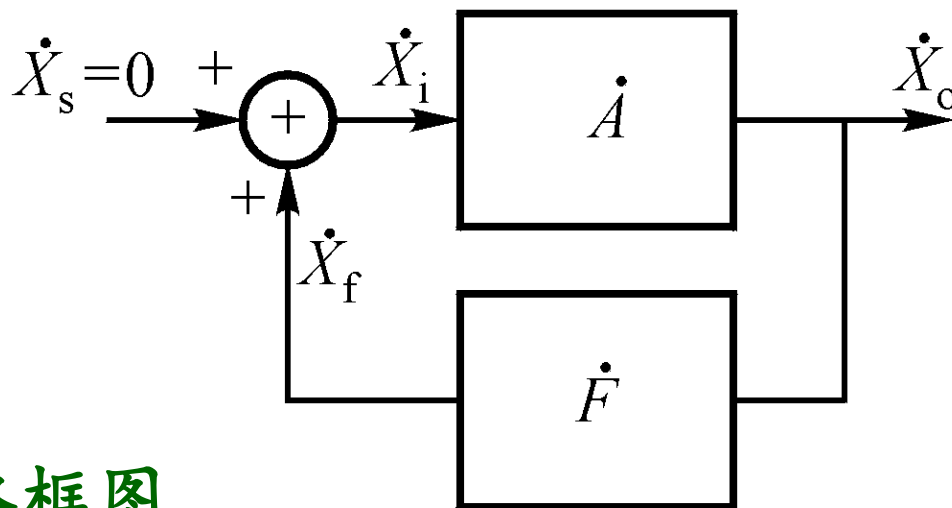
## 第4章 信号发生电路

本章主要讨论正弦波和非正弦波（方波、三角波）产生电路：

- 正弦振荡条件
- $RC$ 正弦振荡电路
- $LC$ 正弦振荡电路
- 石英晶体振荡器
- 电压比较器
- 非正弦波发生电路

## 4.1 产生正弦振荡的条件

- ✧ 在负反馈放大电路中，由于附加相移的存在，在通带以外若形成正反馈，则可能引起自激振荡。
- ✧ 在正弦振荡电路中，为得到**频率一定**、且**幅值稳定**的正弦波振荡，电路中必定要引入正反馈（通带内）。



振荡电路框图

## ✧ 与负反馈电路自激振荡的区别

- 正反馈网络
- 不需要输入信号

## ✧ 振荡条件

$$\dot{X}_f = \dot{X}_i$$

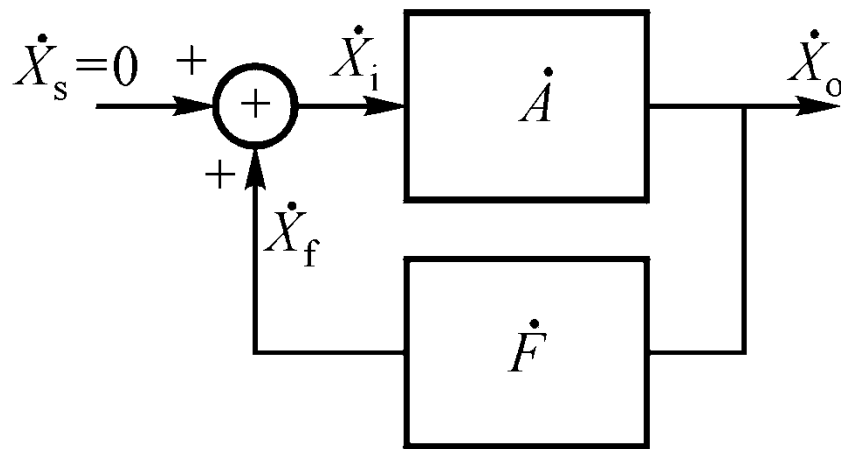
$$\dot{A}\dot{F} = 1 \Rightarrow \text{振荡平衡条件}$$

平衡条件又可以表示成：

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1$$

➡ 幅值平衡条件

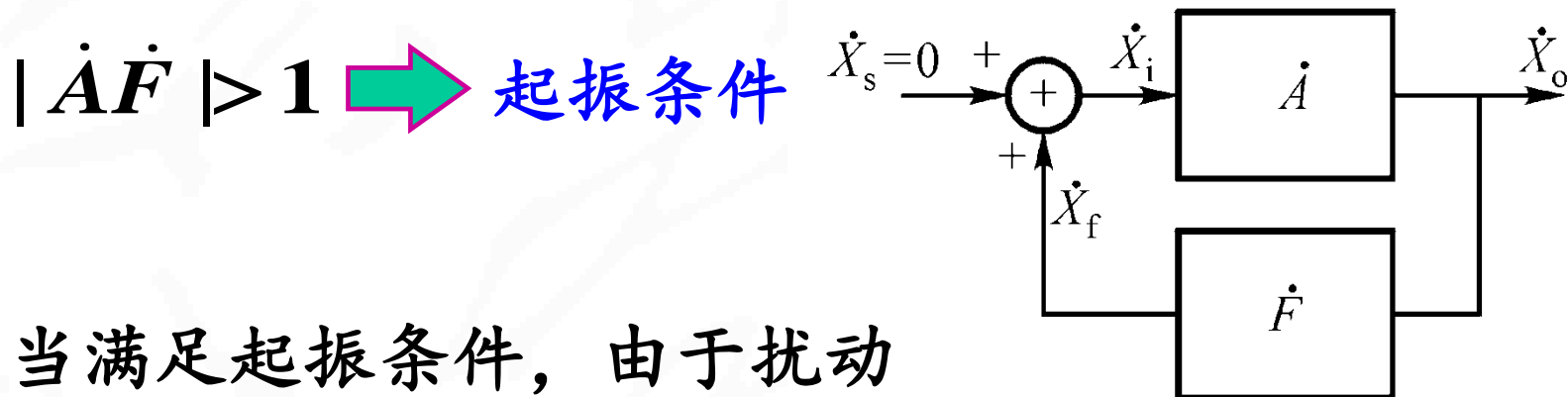
$$\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi \Rightarrow \text{相位平衡条件}$$



与负反馈相比，两者的振荡条件有何区别？

## ➤ 起振条件

- ✧ 接成**正反馈**是放大电路构成振荡器的首要条件。但只满足平衡条件，则实际上无法完成由零开始的起振过程。为了在无输入信号下也能引起自激，反馈电路的环路增益应大于1。



- ✧ 当满足起振条件，由于扰动的影响，尽管幅值很小，但经过反馈环路多次循环，便能使输出信号从小到大增长，直至达到平衡条件。



## ◇ 两个问题

- 产生单一的频率
- 输出无非线性失真

## ◇ 采取两个措施

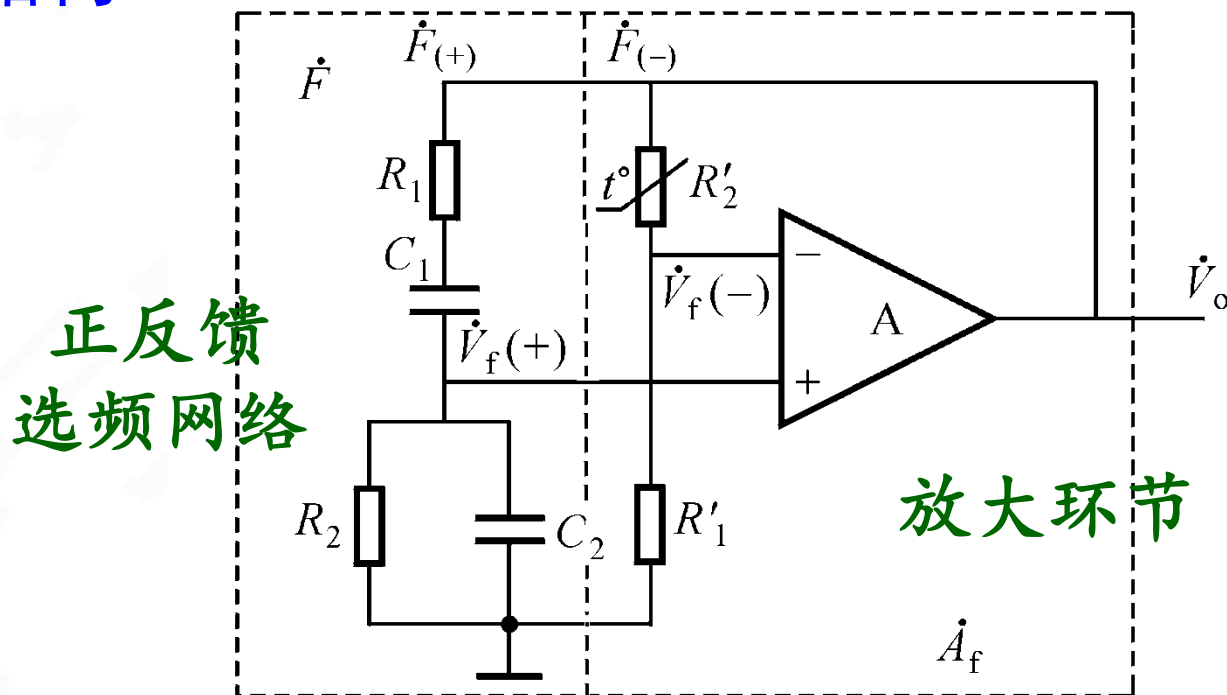
- 选频网络
- 稳幅环节

让两个振荡条件只在某一特定频率下满足，而在其它频率下至少有一个不满足。选频网络可以包含在基本放大器中，也可以设置在反馈网络中。

使环路增益随振荡幅度的增大而自动下降，并最终达到  $|AF|=1$ （振荡平衡条件）的稳定状态。

## 4.2 RC正弦波振荡器

### ➤ 电路结构



**放大环节**为同相输入的比例运算电路， $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = 1 + \frac{R'_2}{R'_1}$   
其中  $R'_2$  为非线性元件，起稳幅作用。

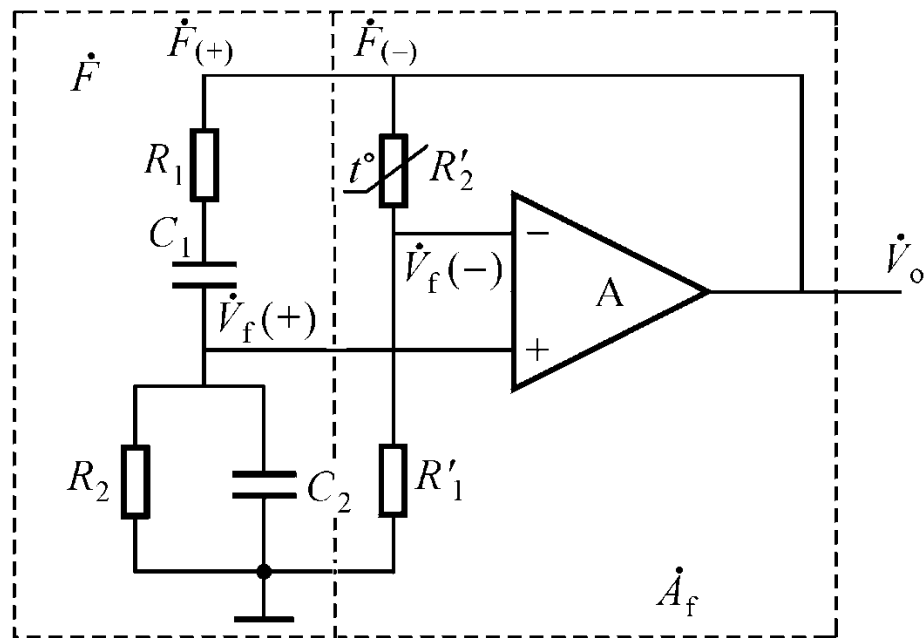
**RC串并联电路**构成正反馈，同时又起选频作用。

## ➤ RC串并联电路的频率特性

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1 + j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = R_2 // \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\dot{F}_{(+)} = \frac{\dot{V}_{f(+)}}{\dot{V}_o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$



通常,  $R_1 = R_2 = R$        $C_1 = C_2 = C$

$$\dot{F}_{(+)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC}}{\frac{1 + j\omega RC}{j\omega C} + \frac{R}{1 + j\omega RC}} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega RC} + j\omega RC + 3}$$

令  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ ，则  $\dot{F}_{(+)} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$

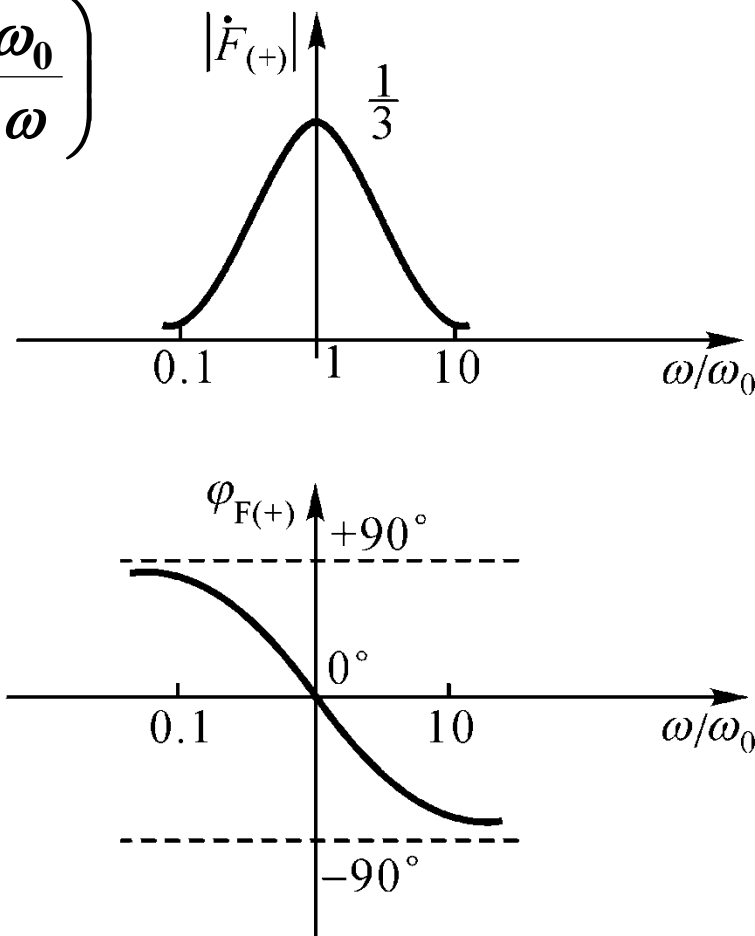
幅频特性表达式：

$$|\dot{F}_{(+)}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

相频特性表达式：

$$\varphi_{F(+)} = -\arctan \frac{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}{3}$$

可以画出频率特性：



当  $\omega = \omega_0 = 1/RC$  时，反馈相位为0，系数为1/3。



## ➤ RC振荡器的工作原理

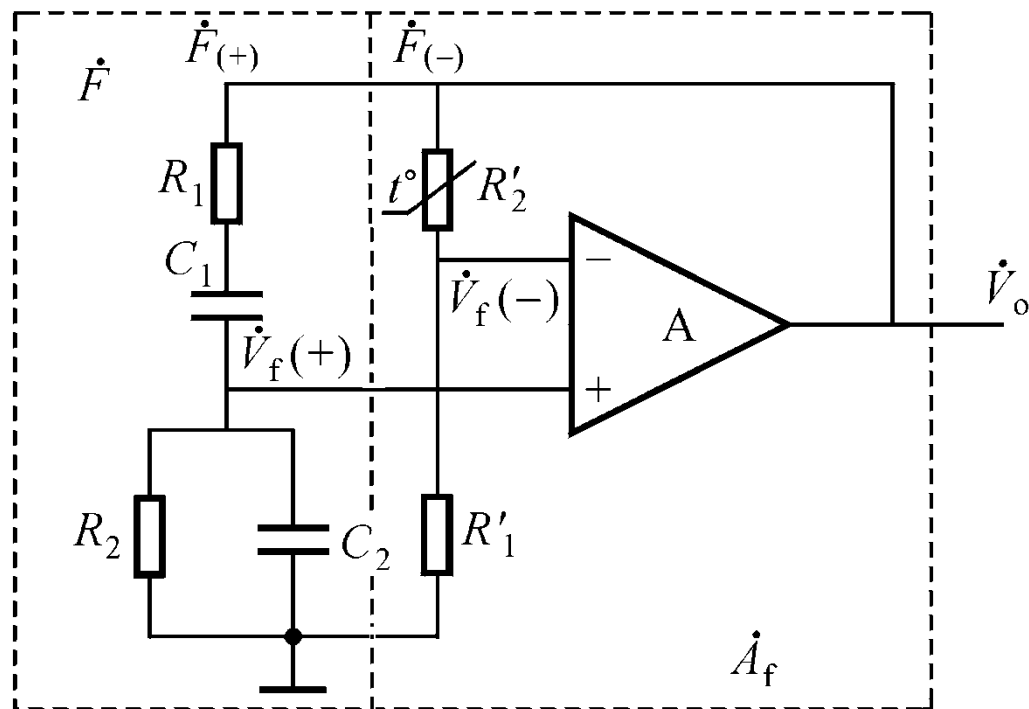
✧ 根据相位平衡条件

$$\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = 0^\circ$$

当  $\omega = \omega_0 = 1/RC$  时,  
 $\varphi_F = 0^\circ$  , 所以要求A为同相放大。

同时振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$



✧ 根据幅值条件,  $|\dot{A}\dot{F}| > 1$  。当  $\omega = \omega_0$  时,  $|\dot{F}| = 1/3$  ,  
 所以要求  $\dot{A}_v = \frac{R'_1 + R'_2}{R'_1} > 3$

## 自动稳幅

当 $A_f > 3$ 时，电路就能起振。但一旦起振后。输出幅度将不断增大，并最终出现严重的失真。因此需要在放大器的负反馈支路中引入非线性元件。

- 二极管
- 场效应管
- 热敏电阻

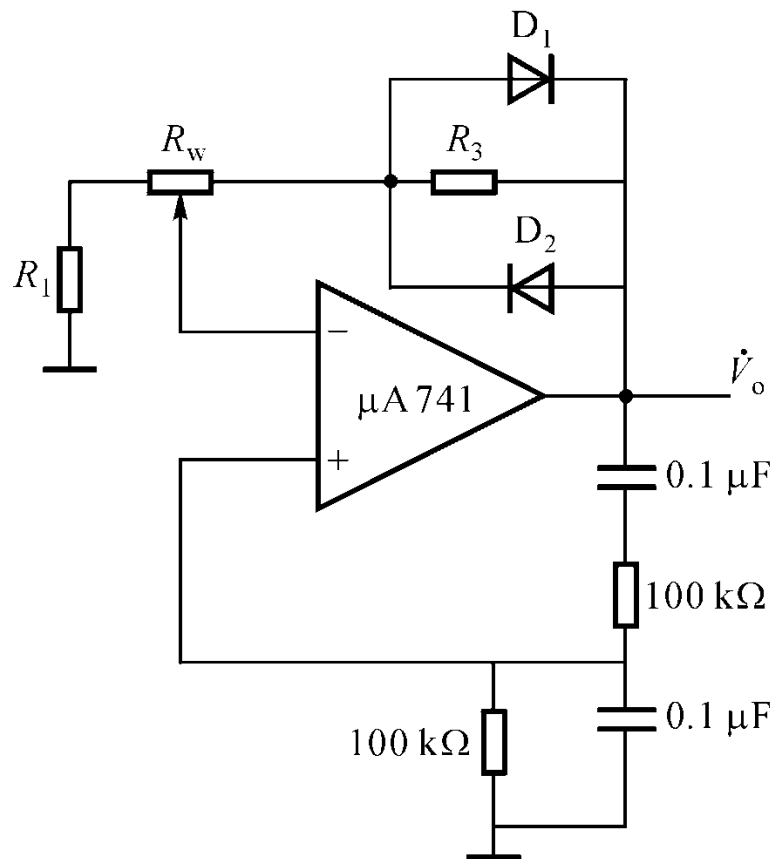
当输出幅度增大时

⇒ 流过二极管的电流增大

⇒ 二极管的等效电阻减小

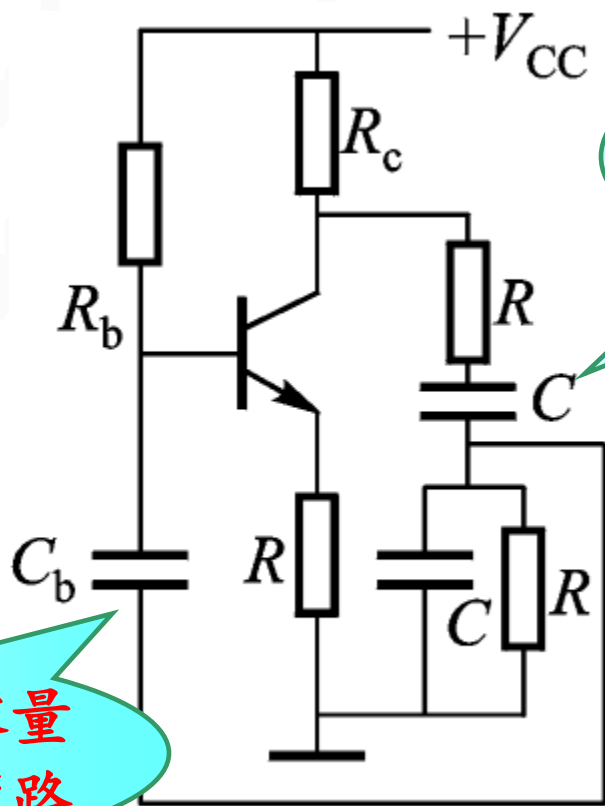
⇒ 使输出幅度减小。

从而稳定输出幅度。



## 【例1】

判断图示电路能否产生正弦振荡。如不能产生正弦振荡，请改正电路使之能产生正弦振荡。



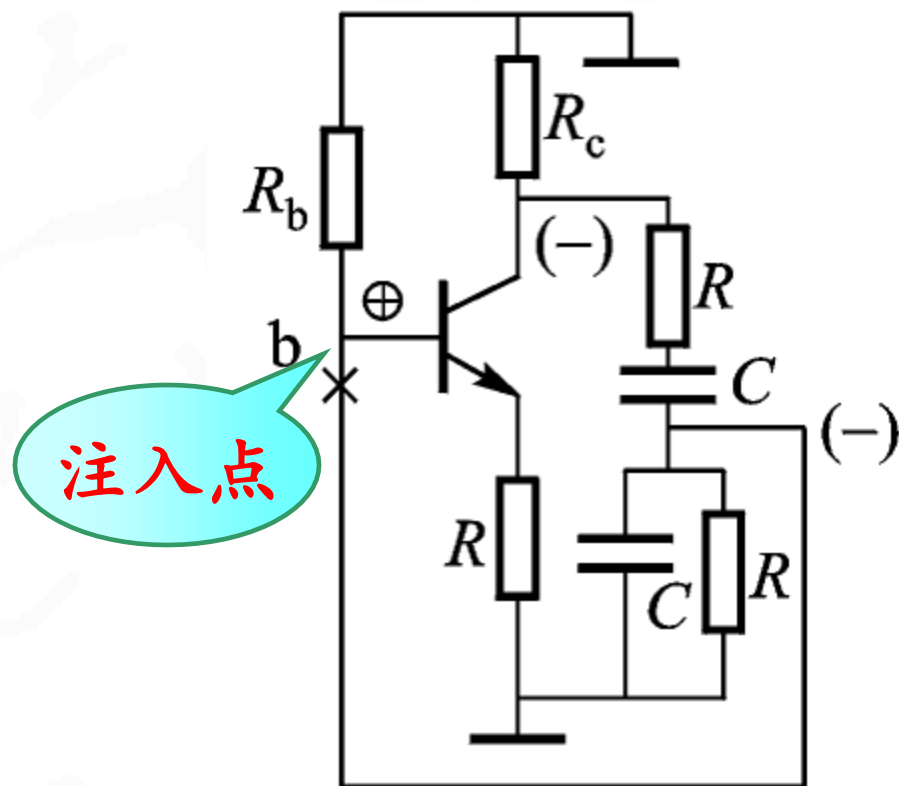
选频电容，容量小，  
用于调节振荡频率

耦合电容，大容量  
交流通路视为短路

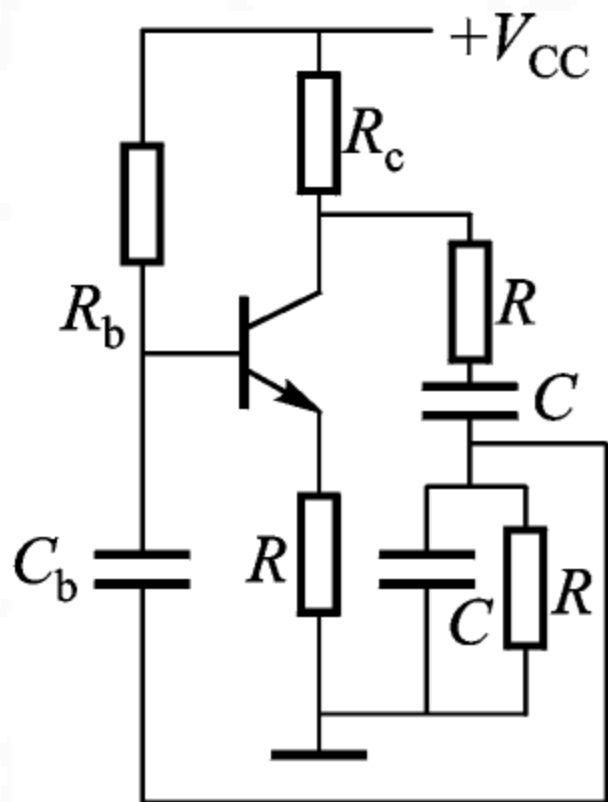
## 【解】 解题方法：

- ✧ 先画出交流通路
- ✧ 用瞬时极性法判断是否满足振荡的相位条件
- ✧ 考虑幅值条件，包括直流偏置、耦合及动态性能

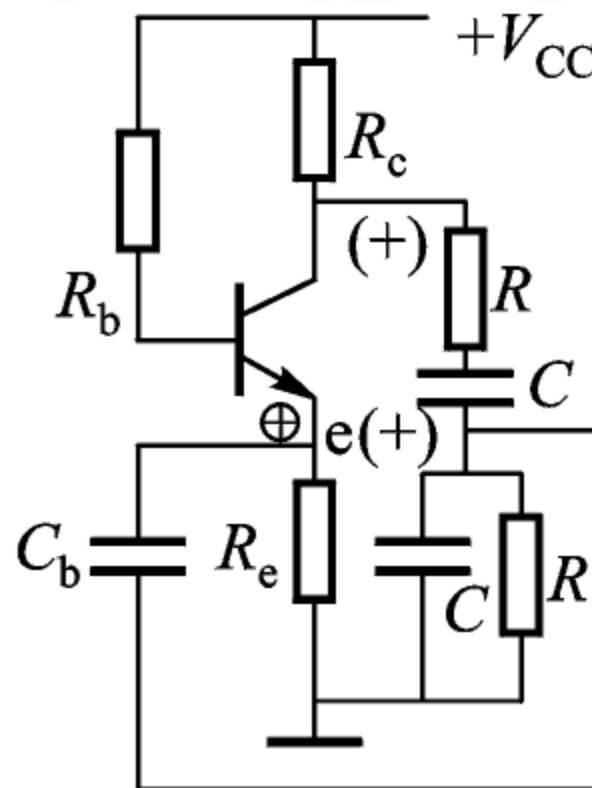
- 1) 找到反馈信号引入点，作为注入点
- 2) 假定反馈回路被切断
- 3) 若反馈回来的极性与注入点极性相同，则反馈回路连通后必然是正反馈



## ✧ 电路改正



CE改  
为CB



若将CE改为CC，是否可行？



## 4.3 LC正弦波振荡器

- ✧ LC正弦波振荡器的选频网络是LC谐振回路。
- ✧ 由于电感的数值较小，其振荡频率较高（几百kHz以上），常用作高频信号源。
- ✧ 由于振荡频率高，要求放大环节具有较高的上限频率，所以LC振荡器常由分立元件构成。
- ✧ LC正弦波振荡器的电路型式：
  - 变压器反馈式
  - 电感三点式
  - 电容三点式

## ➤ LC并联谐振回路的频率特性

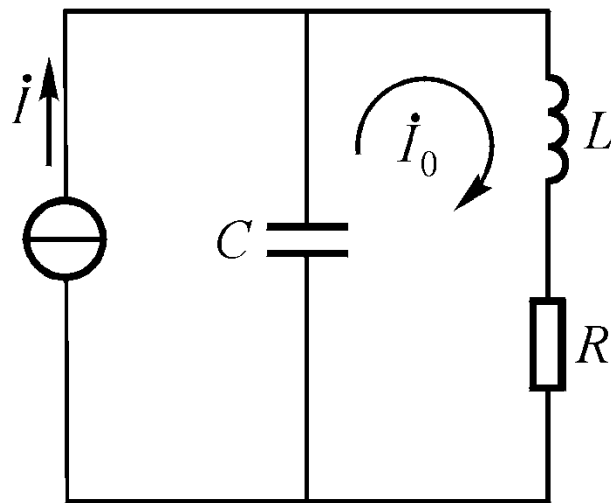
$R$ 为回路的总损耗电阻

并联回路一般由电流源激励

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \parallel (R + j\omega L) = \frac{\frac{1}{j\omega C}(R + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L}$$

通常有  $R \ll \omega L$ ,

$$Z \approx \frac{\frac{1}{j\omega C}(j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L} = \frac{L/C}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$



当  $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ ,

电路发生谐振。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

谐振时的阻抗最大：

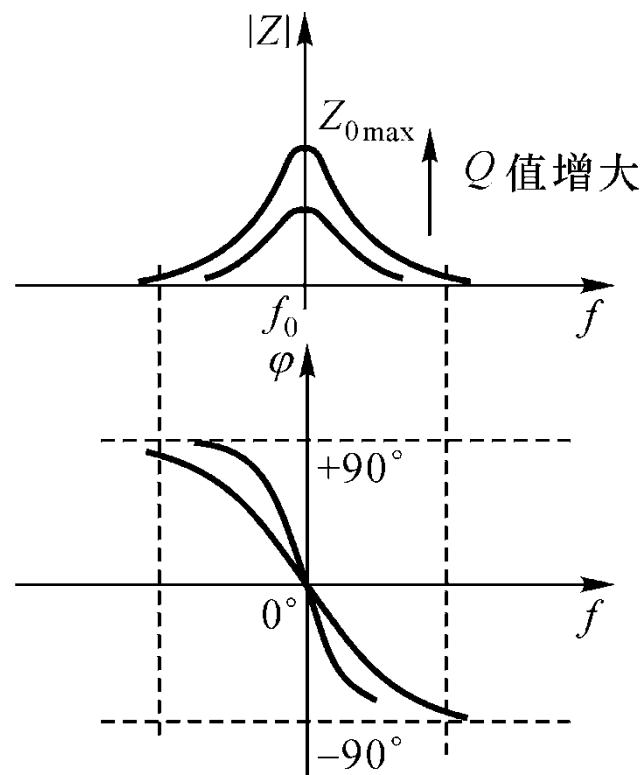
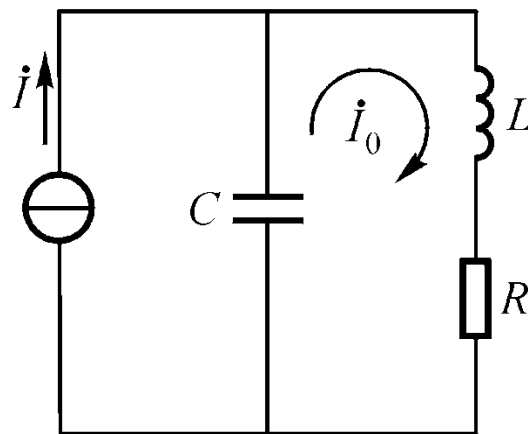
$$Z_{0\max} = \frac{L}{RC} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C} = Q\sqrt{\frac{L}{C}}$$

式中， $Q$ 称为品质因数

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C}$$

发生谐振时，阻抗 $|Z|$ 最大，  
且为纯阻性。

**$Q$ 越大，频率特性越陡，  
选频特性越好。**



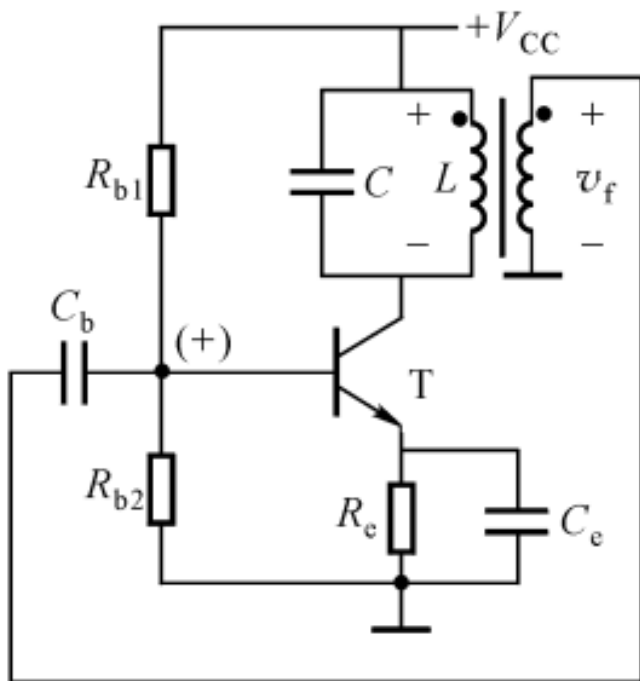




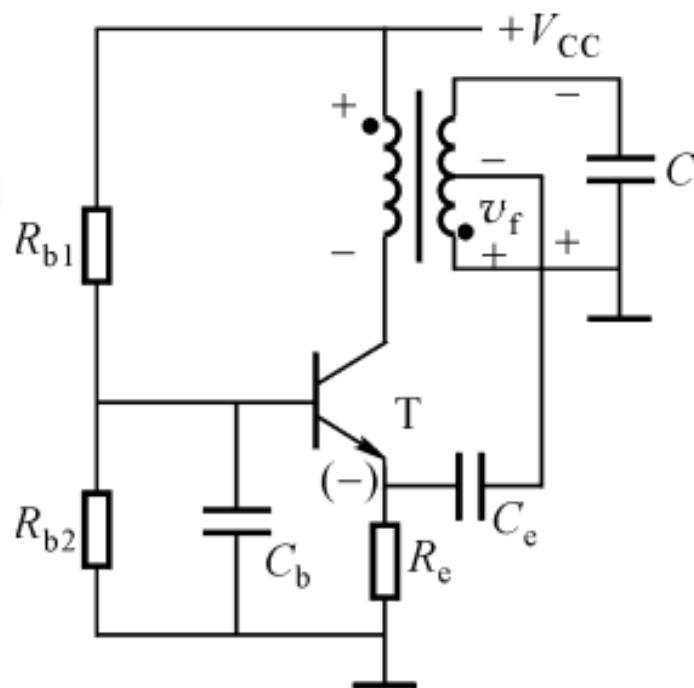
# 一、变压器反馈式LC正弦振荡器

## ✧ 电路结构

- LC选频电路串联在基本放大器中
- LC选频电路串联在反馈回路中



LC位于基本放大器中



LC位于反馈回路中



## ➤ LC振荡电路的分析方法

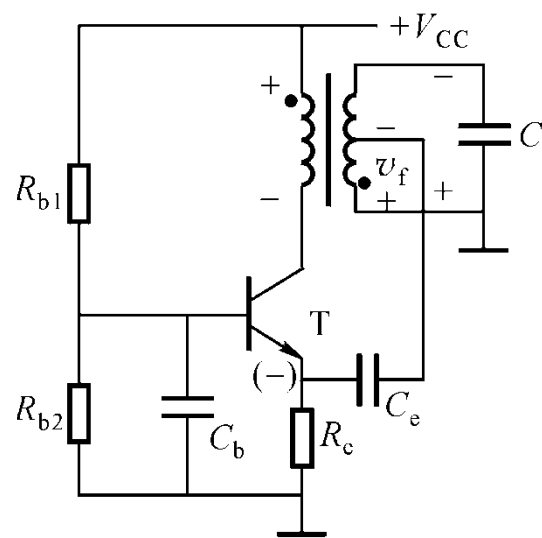
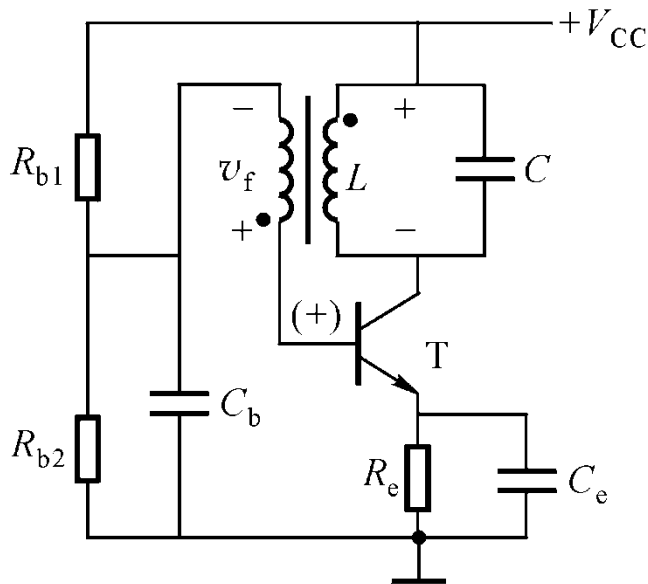
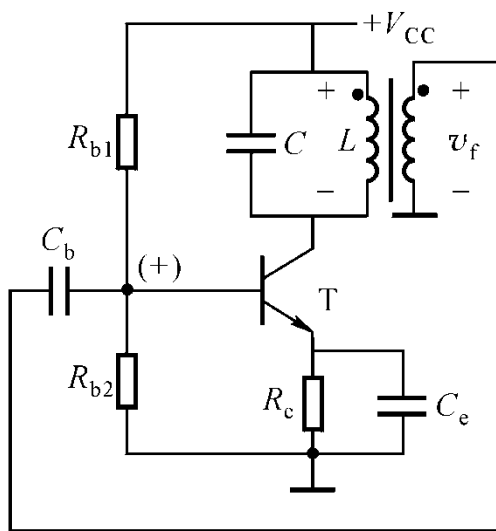
- ✧ 分析振荡相位条件时应考虑**交流通路**(耦合电容和旁路电容当作短路，但谐振电容不能视为短路)。
- ✧ 与反馈信号相连的输入端视作外加信号**注入端**，当反馈信号的瞬时极性与注入端极性一致时，为正反馈。
- ✧ 若不为正反馈时，只需调整变压器同名端位置即可，或改变反馈信号注入点的位置。
- ✧ 对于振荡幅值条件，调整变压器变比非常容易。
- ✧ 还应考虑电路的**直流偏置**，保证工作在放大状态。



## 变压器反馈式LC正弦振荡器的振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

【例1】有以下三个变压器反馈式的电路，试分析能否产生正弦振荡？

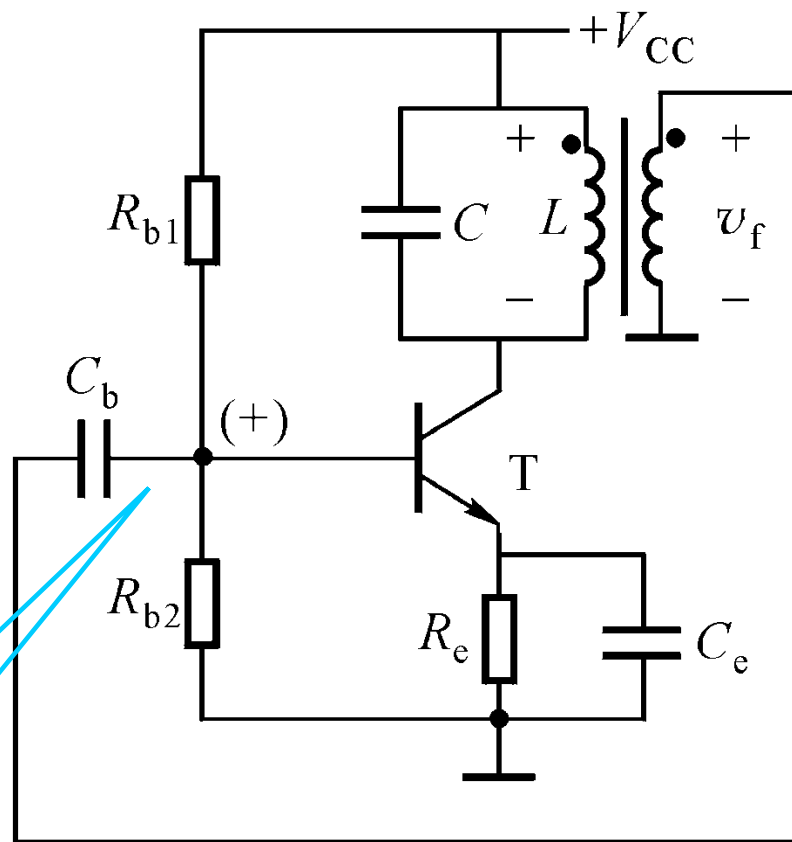


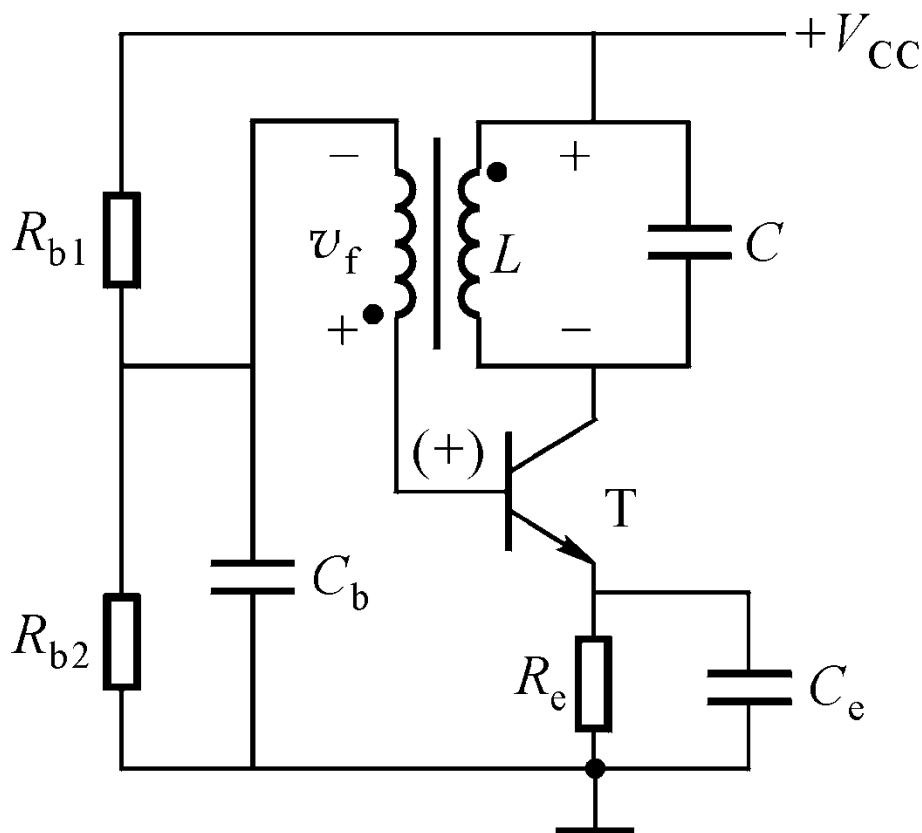


【解】

在谐振频率下， $C_b$  和  $C_e$  都可视为短路。因此用瞬时极性法，可得反馈到基极的信号与原输入同相，即满足相位条件。所以能产生正弦振荡。

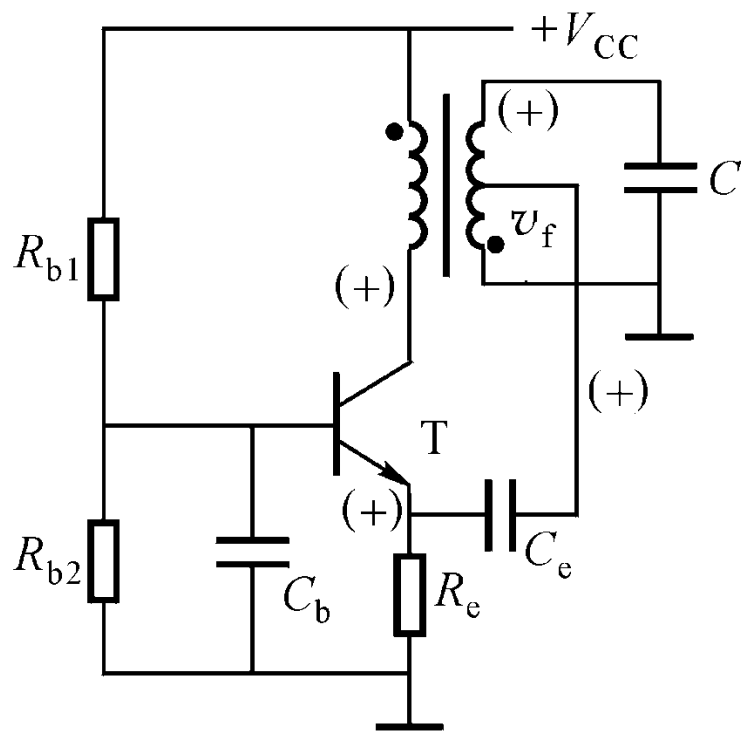
注入点





这是一个**共射**电路组成的正弦振荡电路。同样在谐振时， $C_b$ 和 $C_e$ 都可视为短路。由瞬时极性分析，同样满足相位条件，所以，也能产生正弦振荡。

放大环节由CE电路组成， $\varphi_A = -180^\circ$ ，为此要求反馈环节的相位  $\varphi_F = -180^\circ$ 。所以可通过**调整同名端**来设置正反馈。



这是**共基**正弦波振荡器，反馈信号从发射极注入，由瞬时极性同样得到这电路能产生正弦波。

当工作在共基组态时，由于其高频小信号模型中不必考虑基极与集电极之间结电容的密勒效应，所以其**上限频率**远远**高**于共射组态的上限频率，所以共基组态可以允许**LC**振荡器有更高的工作频率。

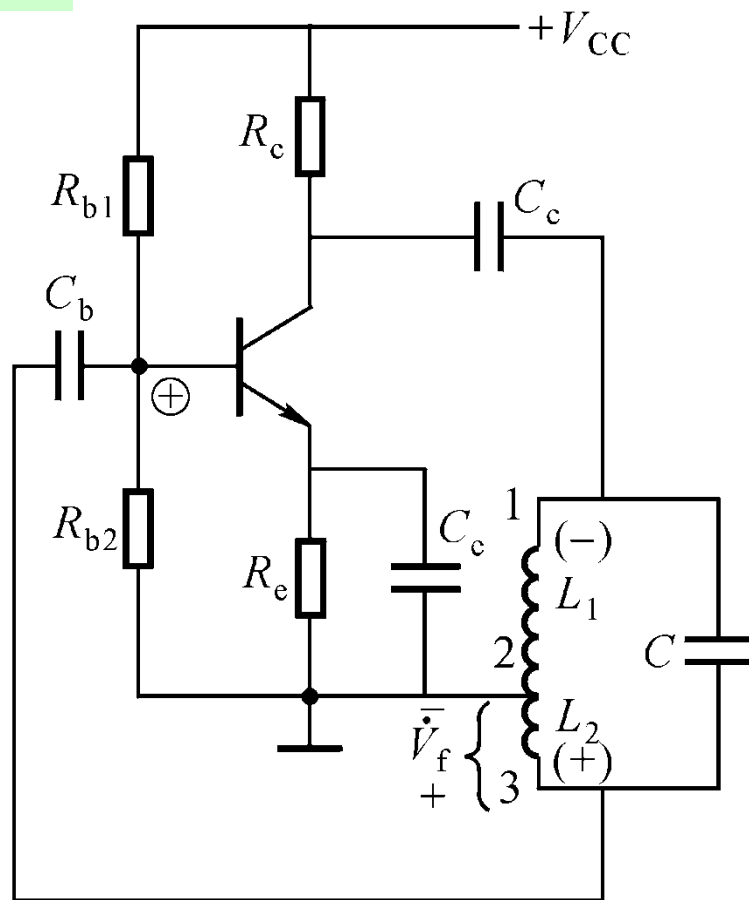
## 二、三点式LC正弦振荡器

### ➤ 电感三点式

也称 **Hartley** 振荡器

反馈电压取自  $L_2$ ，类似于 **自耦变压器振荡器**，满足振荡的相位条件。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$$



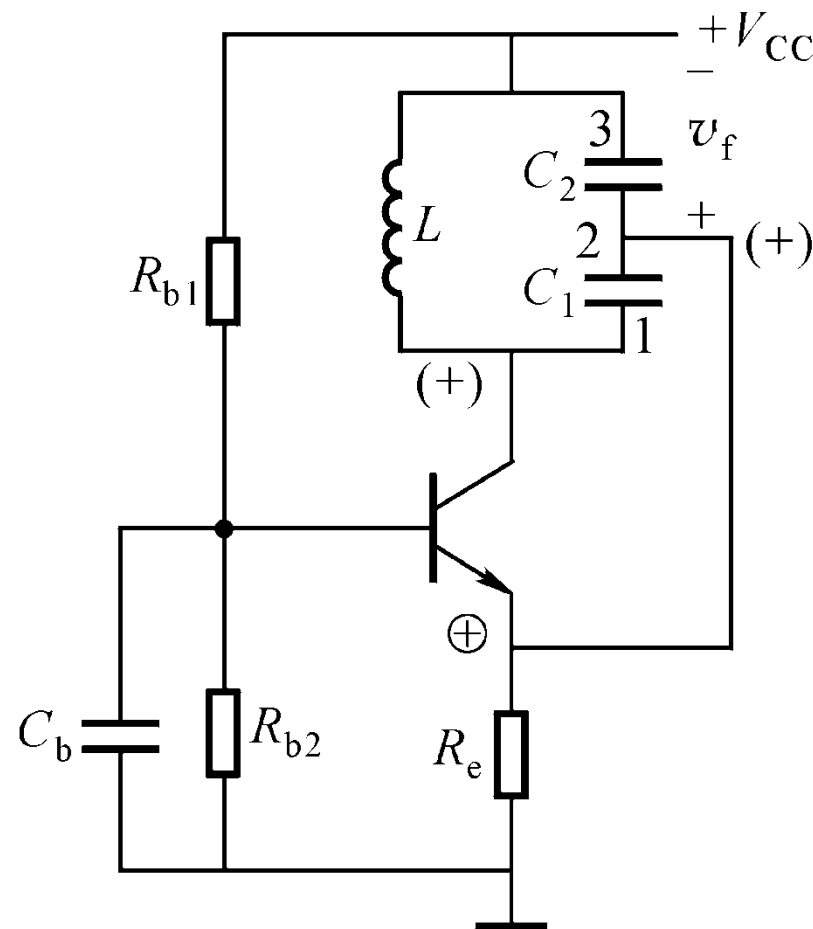
电感三点式振荡器的优点是电路**容易起振**，缺点是**波形不太好**。

## 电容三点式

也称 **Colpitts振荡器**

反馈电压取自 $C_2$ ，满足振荡的相位条件。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$



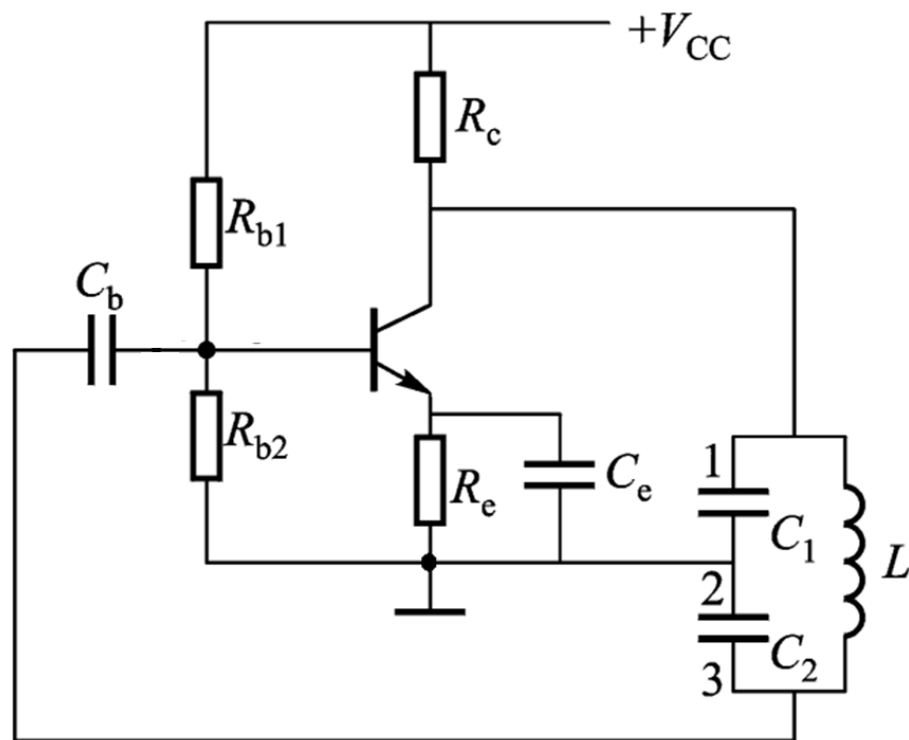
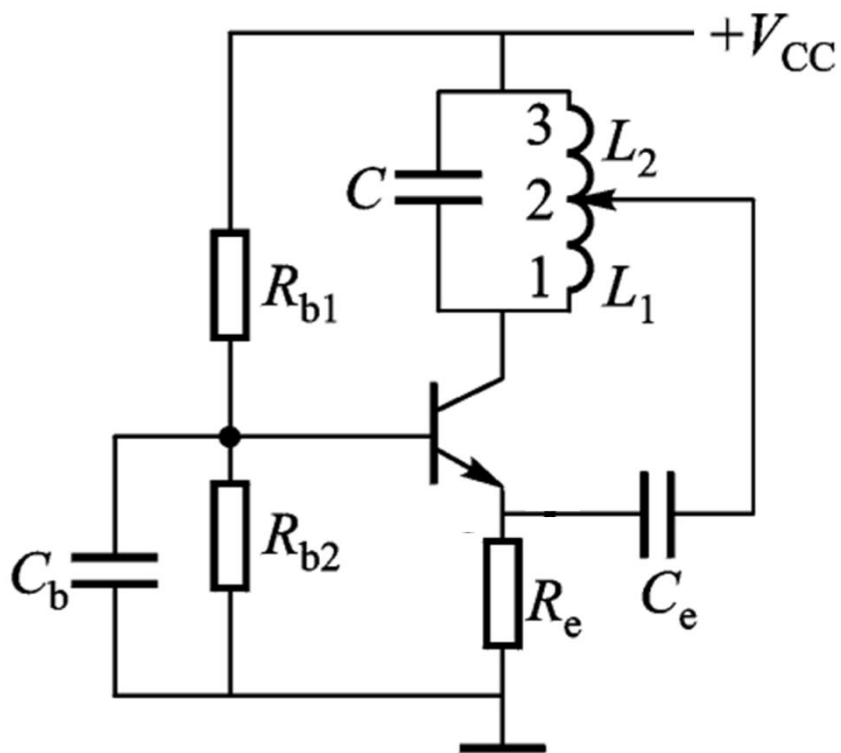
电容三点式振荡器的优点是**波形较好**（因电容 $C_2$ 滤去高次谐波），缺点是电路**不易起振**。



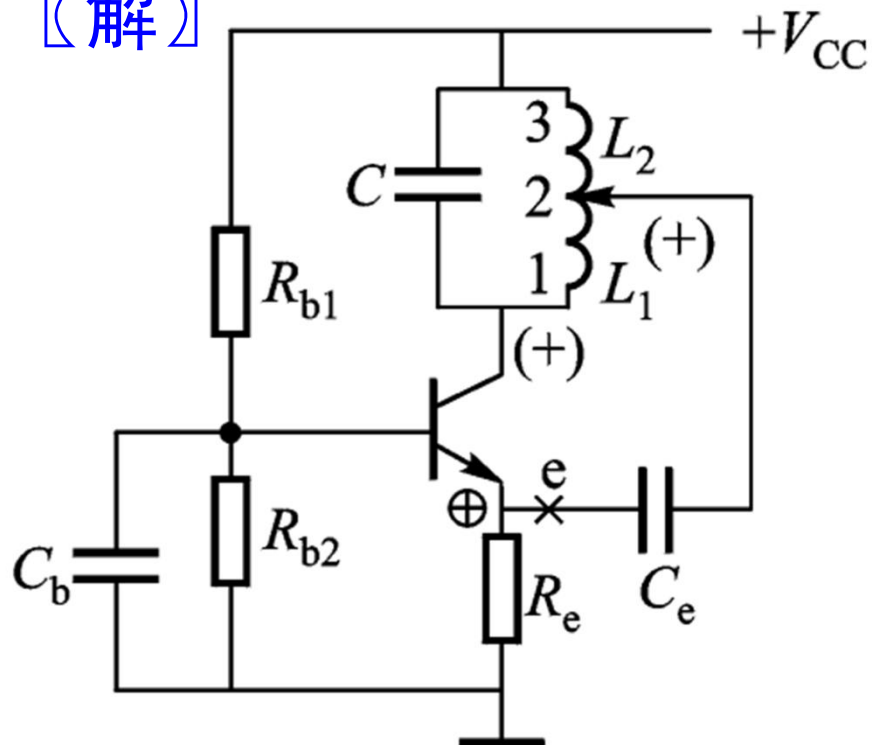


## 【例2】

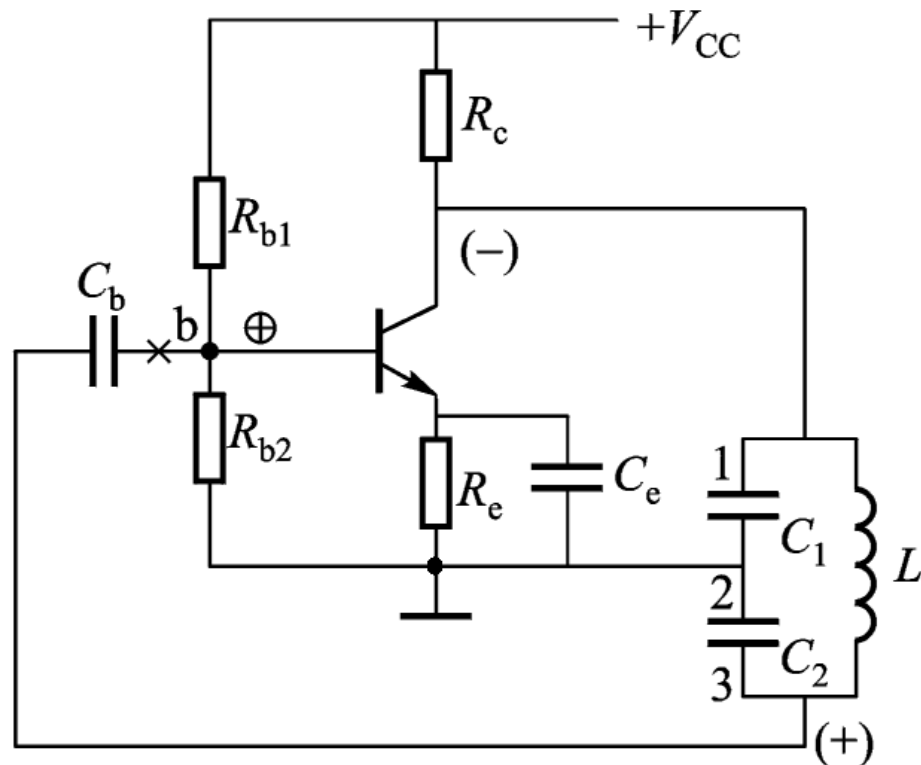
判断图示电路是否满足正弦振荡条件。



【解】



电感三点式  
满足。



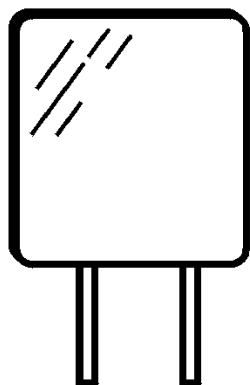
电容三点式  
满足。

可以证明：当同相输入端为同一类电抗(同为电感或同为电容)，三点式振荡器满足振荡相位条件。

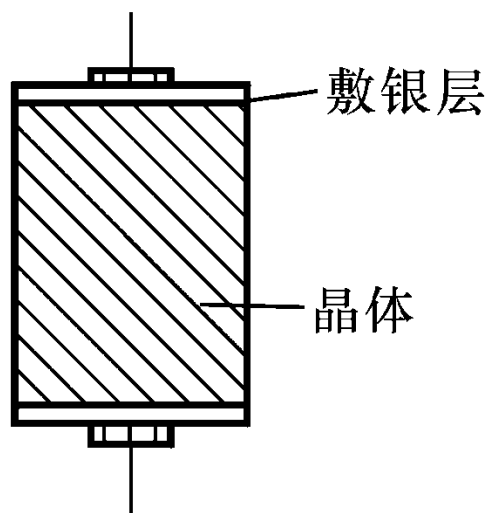


## 4.4 石英晶体振荡器

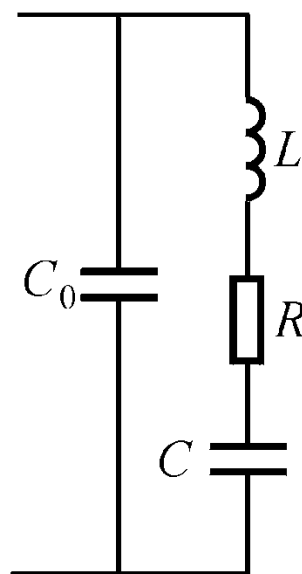
石英晶体是利用 $\text{SiO}_2$ 结晶体的压电效应制成的一种谐振器件。



外形



结构



等效电路



电路符号



## ◇ 石英晶体的压电效应

在石英晶体的两电极之间加一电场，晶片会产生机械变形；反之，在晶体两侧加机械压力时，则在晶体内部垂直方向上产生电场。

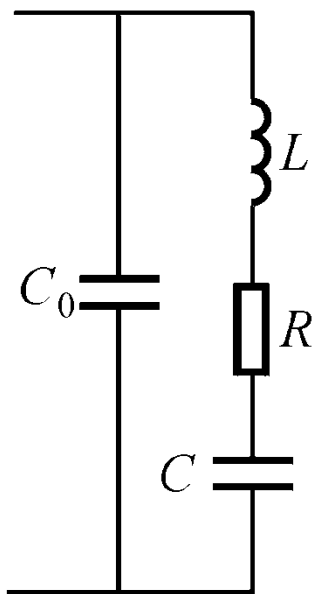
如果在石英晶体的两电极之间加**交变电压**，晶片将产生机械振动；同时，机械振动又会产生交变电场。

## ◇ 压电谐振

当石英晶体所加交变电压的频率为一特定频率时，其振动幅度和电场幅度明显增大，称为压电谐振（与 $LC$ 谐振回路相似）。谐振频率由晶体的切割方式、形状和尺寸决定。



## ◇ 等效电路



$L$ : 模拟晶体机械振动的惯性,  
 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{H}$

$R$ : 模拟机械振动摩擦损耗, 很小

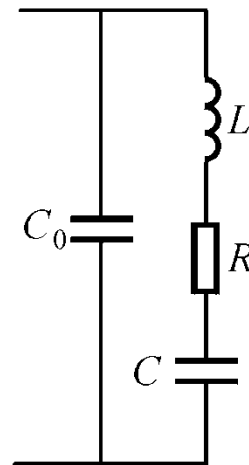
$C$ : 晶体弹性电容,  $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{pF}$

$C_0$ : 静电电容 (平行板电容), 约  
几~几十  $\text{pF}$

因  $L$  大,  $C$ 、 $R$  小, 石英晶体的品质因数  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$   
很高 ( $10^5 \sim 10^6$ )。又因加工精度很高, 所以能获得很  
高的频率稳定度。

在忽略 $R$ 时，等效电抗为：

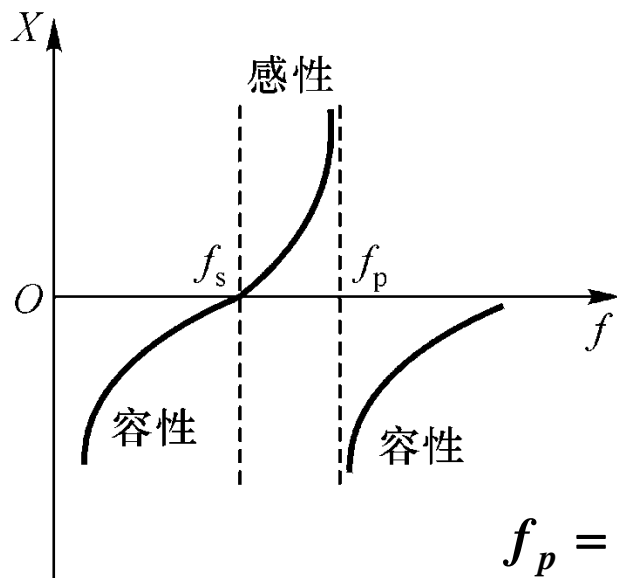
$$X = \frac{-\frac{1}{\omega C_0}(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{-\frac{1}{\omega C_0} + (\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega(C_0 + C - \omega^2 LC_0 C)}$$



频率特性：

当电抗为  $\omega^2 LC - 1 = 0$ ， $X=0$ ，回路产生**串联谐振**。

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



当 $f > f_s$ 时， $LCR$ 支路呈感性，与 $C_0$ 构成**并联谐振**，谐振频率为：

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}\sqrt{\frac{C_0}{C+C_0}}} = f_s\sqrt{1+\frac{C}{C_0}} \approx f_s$$

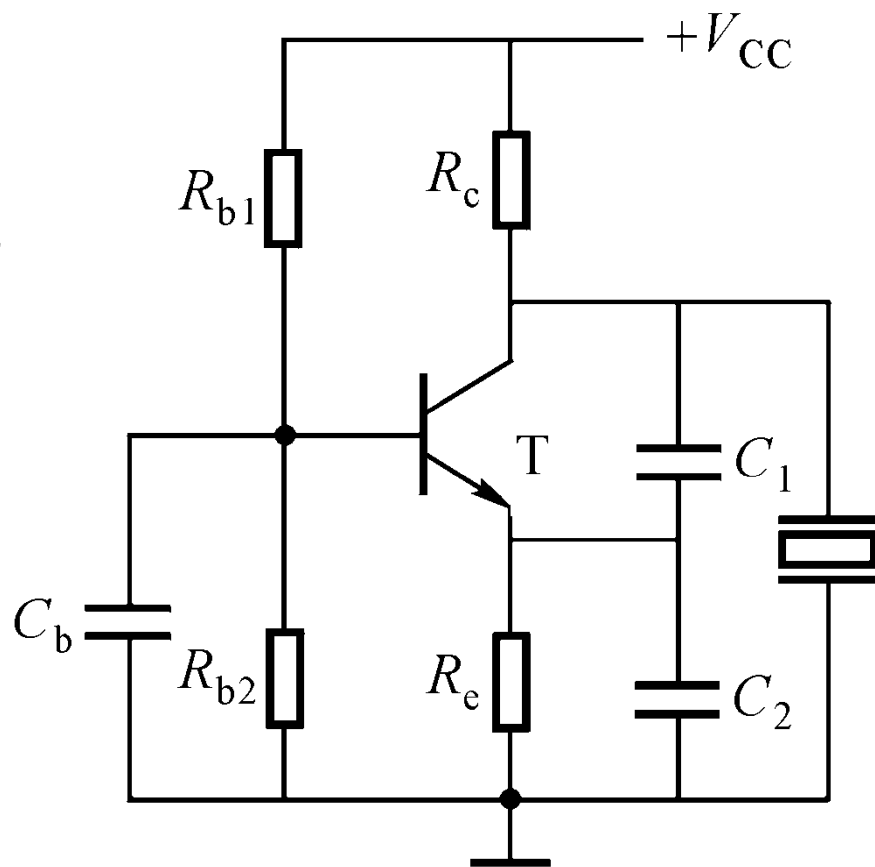
## ➤ 石英晶体振荡器的两种基本形式

### ◇ 并联式

将振荡频率设计在 $f_s$ 和 $f_p$ 之间，使晶体呈感性，它与两只电容构成电容三点式正弦振荡。

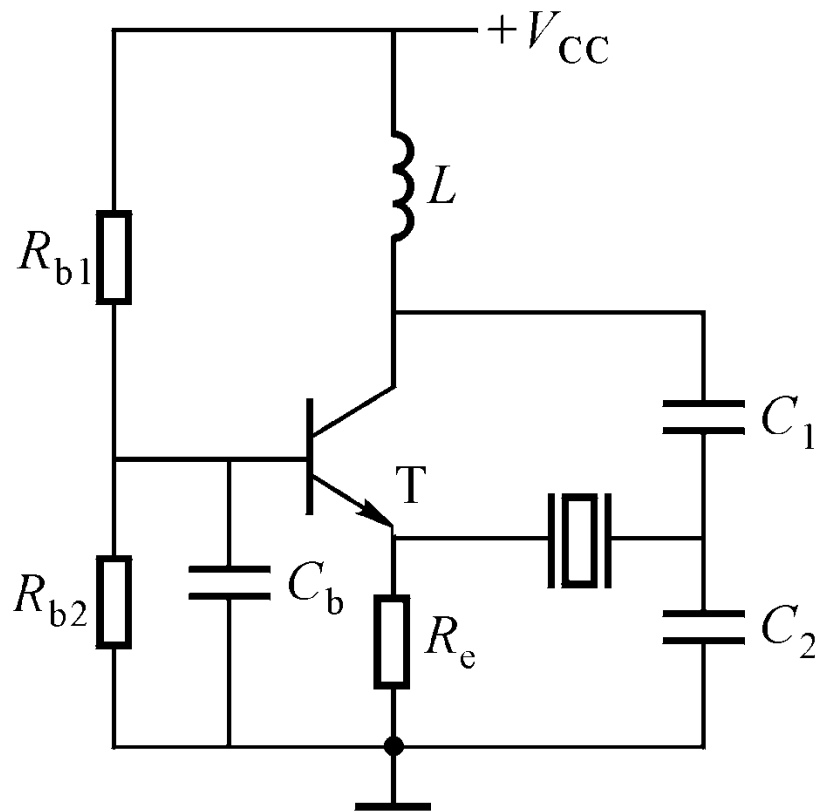
$$f_o = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C'}}$$

其中 
$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_0$$





## ◇ 串联式



石英晶体接在正反馈支路中。当  $f = f_s$  时，晶体电抗为0，正反馈最强，满足振荡条件，而在其它频率下不满足振荡条件。所以振荡频率为  $f_s$ 。





## 4.5 非正弦波的产生与变换

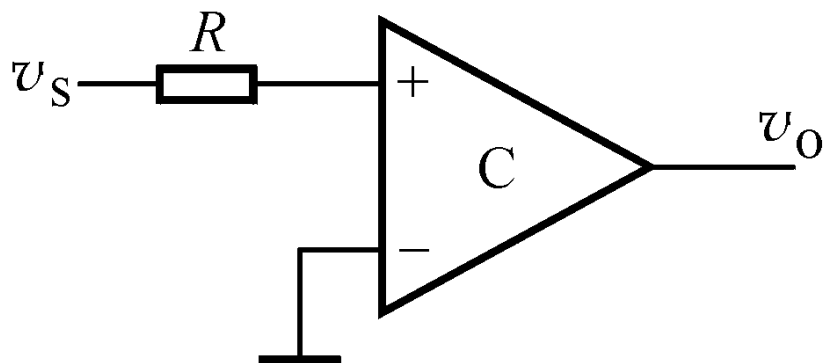
### 一、电压比较器

- ✧ 电压比较器是将输入信号与已知参考电压进行比较，输出高电平或低电平两种结果。
- ✧ 电压比较器是模拟电路与数字电路之间的接口电路。
- ✧ 对电压比较器的要求是：动作迅速、反应灵敏、判断准确、抗干扰能力强。
- ✧ 电压比较器可由通用型集成运放构成（属于**非线性应用**），但专用集成电压比较器的性能更佳。

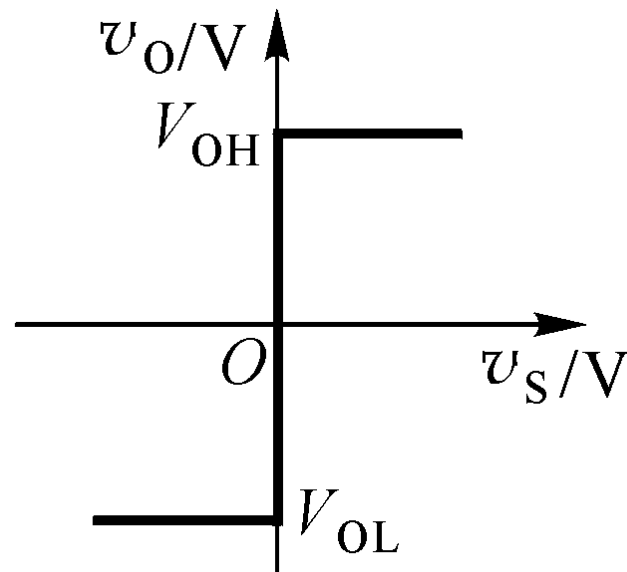
## 1、单限比较器

集成运放工作在开环状态，分为同相输入和反相输入两种。若参考电压为0，则称为过零比较器。

### ◇ 过零比较器



同相过零比较器

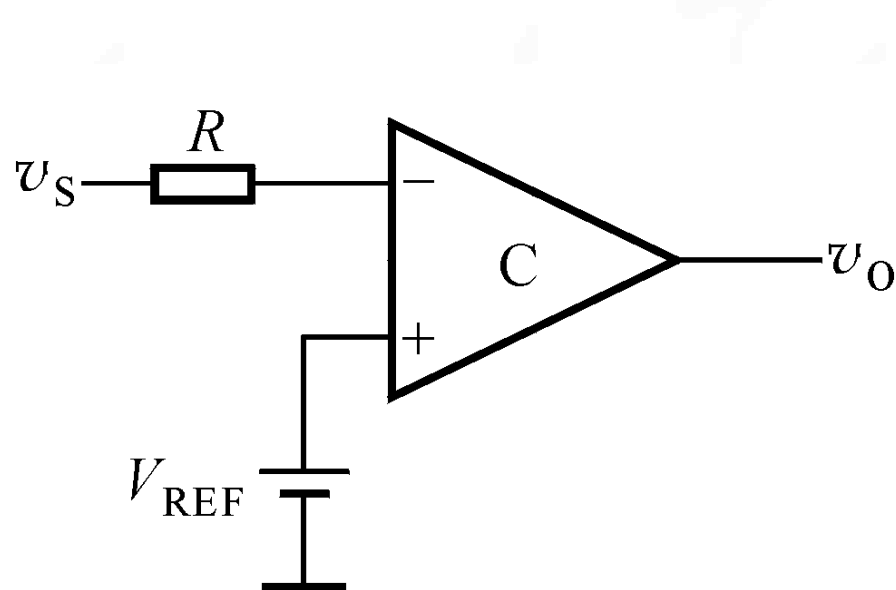


电压传输特性

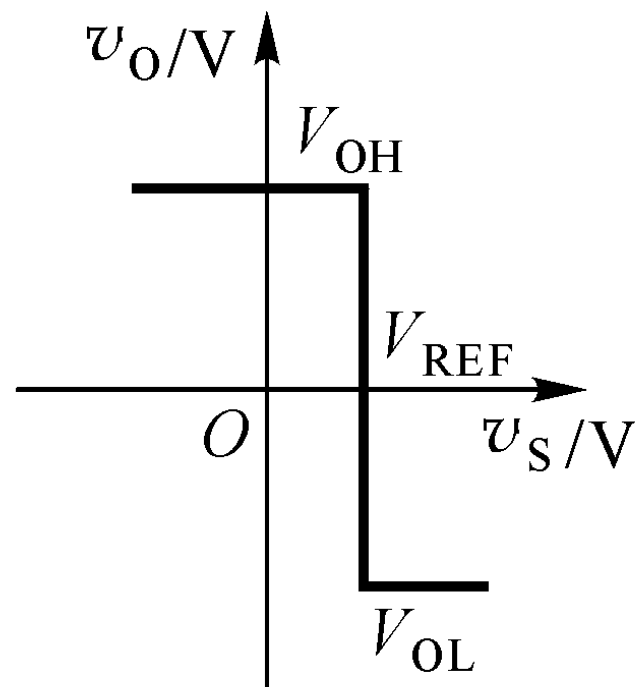
若要构成反相过零比较器，则应如何？

## ◇ 非过零的单限比较器

增加参考电压 $V_{\text{REF}}$ ，则为非过零的**单限比较器**。



反相单限比较器

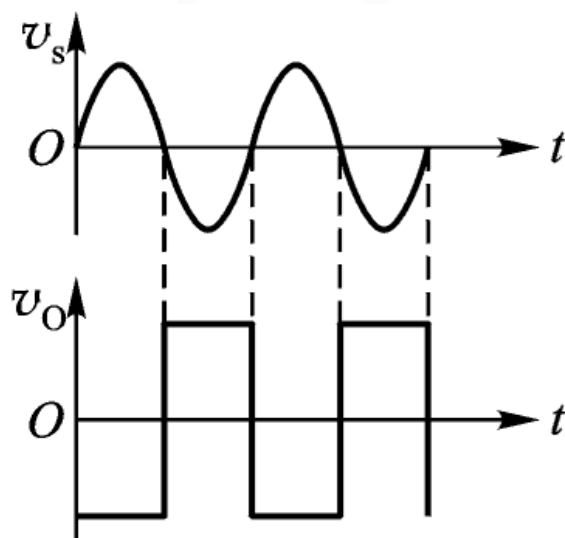


电压传输特性

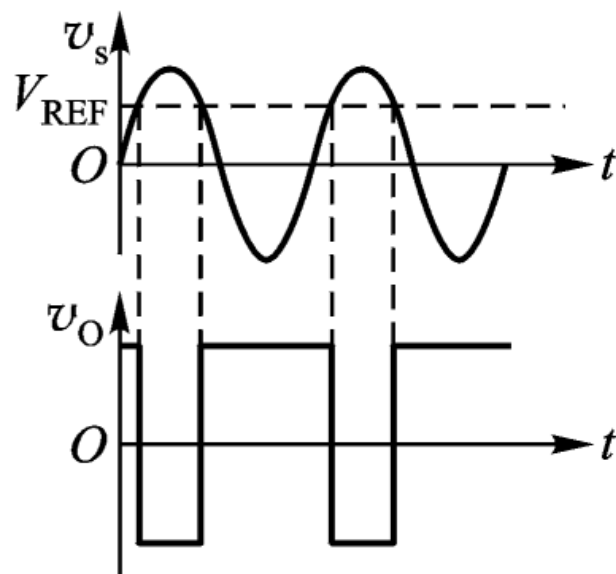
门限电平（触发电平、阈值电平）为 $V_{\text{REF}}$ 。

## ◇ 比较器的用途

- 信号极性鉴别、幅值鉴别
- 波形变换



正弦波变换为方波

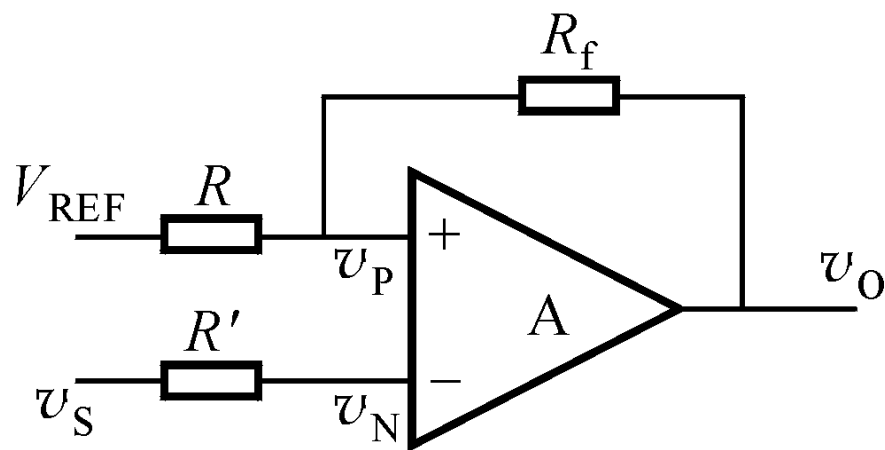


正弦波变换为矩形波

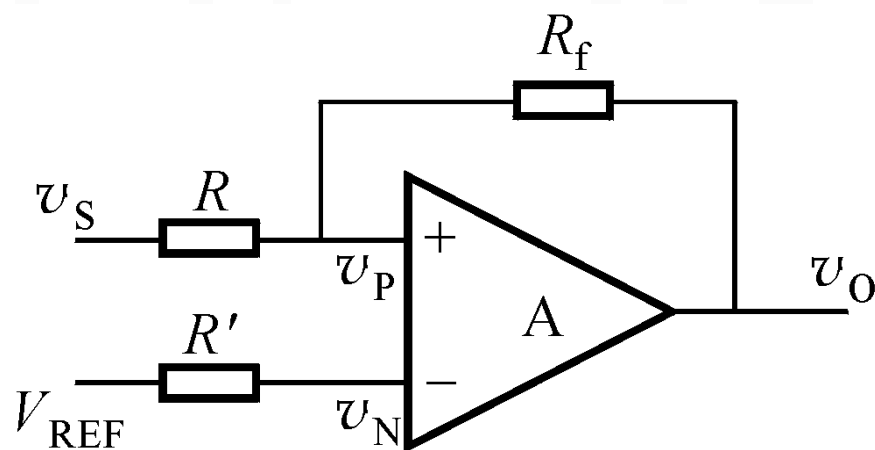
单限比较器的特点是结构简单、灵敏度高，但抗干扰能力差。

## 2、滞回比较器

- ✧ 为了实现滞回特性，电路中引入**正反馈**。
- ✧ 又称为**迟滞型比较器**、**施密特触发器**。
- ✧ 滞回比较器有同相输入和反相输入两种方式。



反相输入

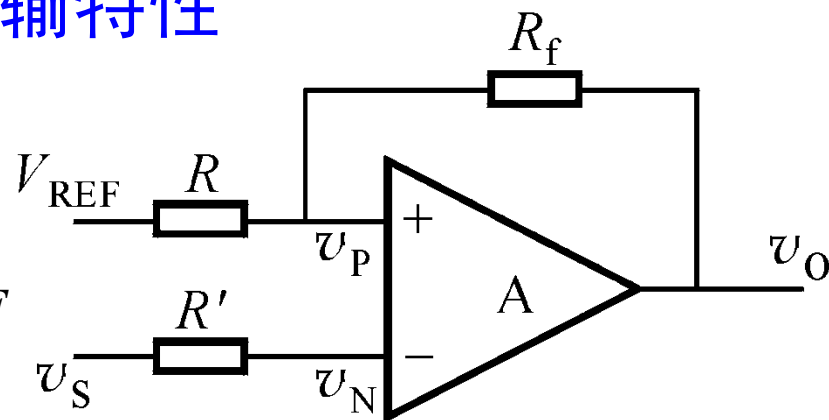


同相输入

## ➤ 反相滞回比较器的电压传输特性

$$v_N = v_S$$

$$v_P = \frac{R}{R + R_f} v_O + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF}$$



✧ 若  $v_O = V_{OH}$ , 则 
$$v_P = \frac{R}{R + R_f} V_{OH} + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF} = V_{TH}$$

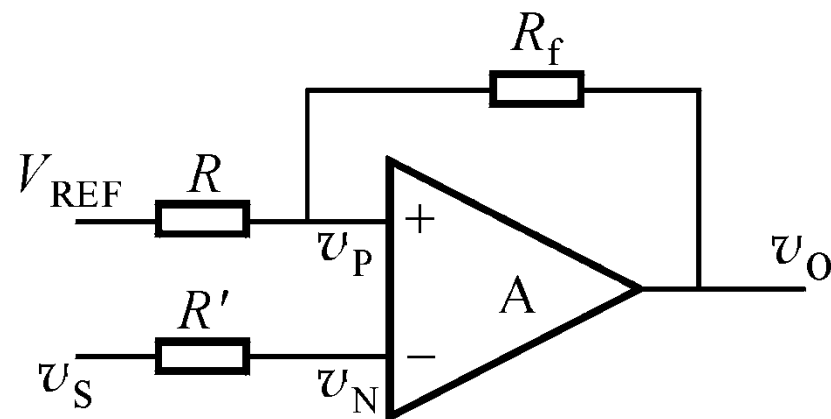
当  $v_S > V_{TH}$  时,  $v_O$  跳变为  $V_{OL}$ 。  $V_{TH}$  称为上触发电平

✧ 当  $v_O = V_{OL}$ , 则 
$$v_P = \frac{R}{R + R_f} V_{OL} + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF} = V_{TL}$$

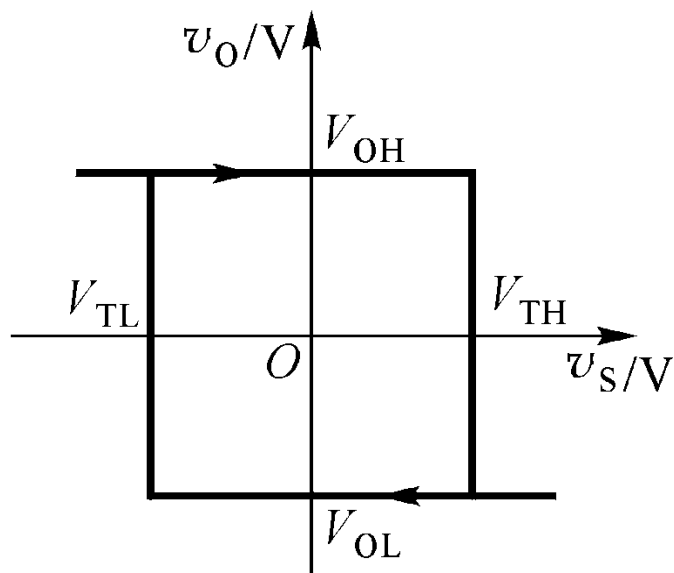
当  $v_S < V_{TL}$  时,  $v_O$  跳变为  $V_{OH}$ 。  $V_{TL}$  称为下触发电平

$$V_{TH} = \frac{R}{R + R_f} V_{OH} + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF}$$

$$V_{TL} = \frac{R}{R + R_f} V_{OL} + \frac{R_f}{R_f + R} V_{REF}$$



由于滞回比较器中引入正反馈，使  $V_{TH} \neq V_{TL}$ ，得到电压传输特性曲线：



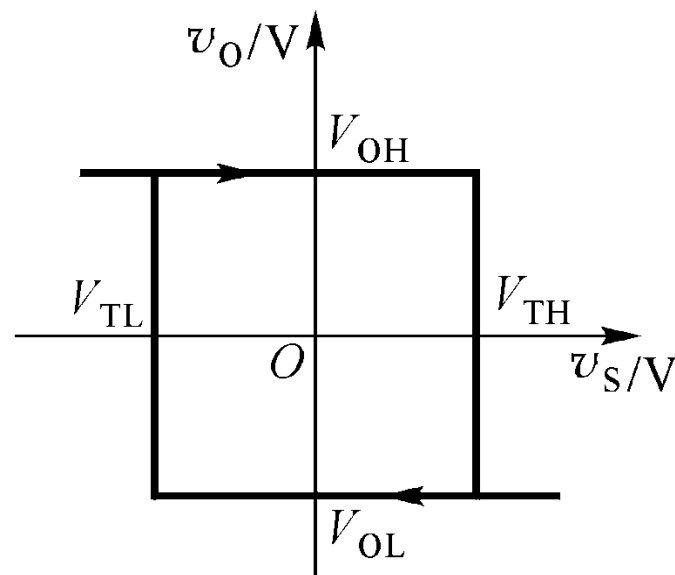
若增大  $V_{REF}$ ，电压传输特性将如何变化？

若增大  $R_f$ （设  $V_{REF}=0$ ），电压传输特性将如何变化？

## ☆ 回差特性

回差特性是滞回比较器十分重要的特性。**回差电压**（简称**回差**）为

$$\Delta V = V_{TH} - V_{TL}$$

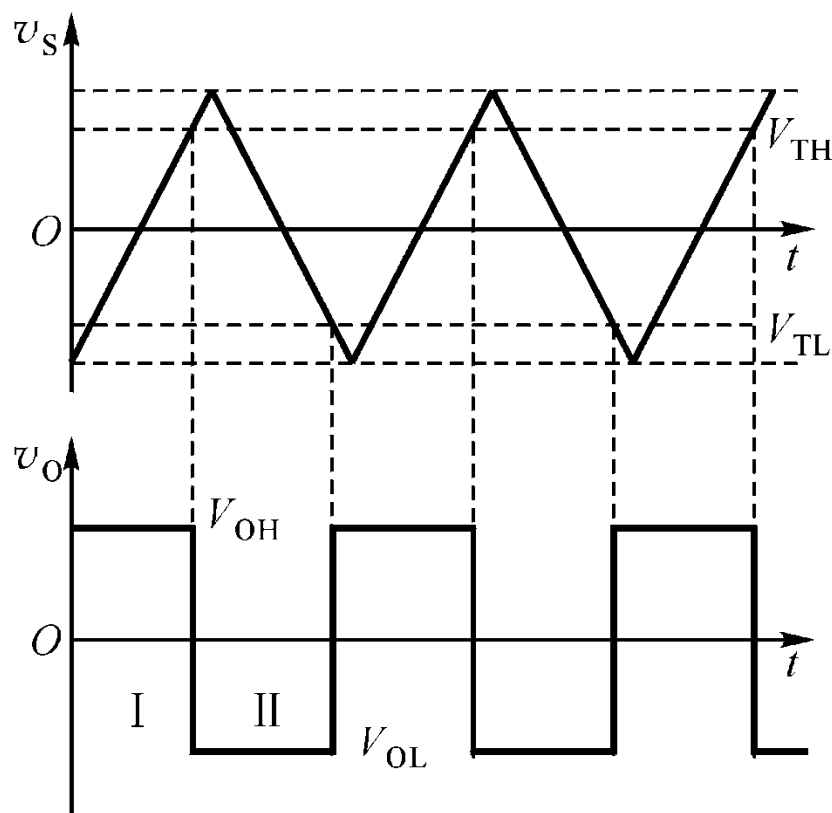


回差电压越大，电路越不易误触发，**抗干扰能力越强**，但对信号的反应灵敏度变差。

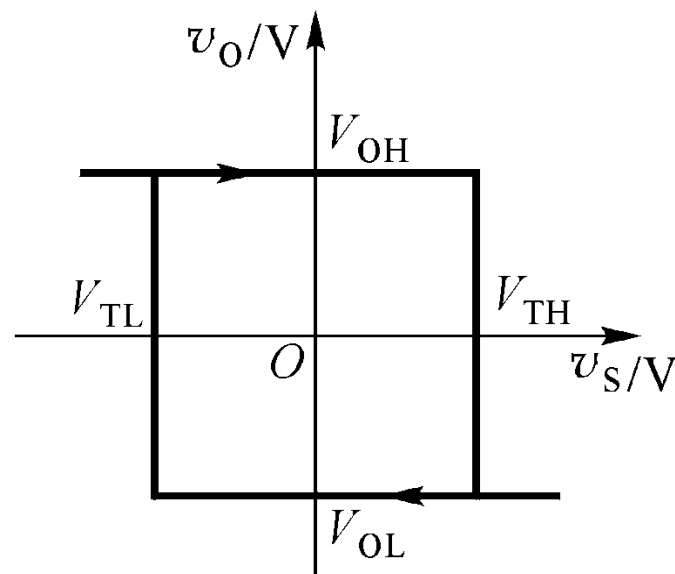


## ➤ 滞回比较器应用示例

以反相滞回比较器为例，若输入信号为三角波，则输出是一个方波。

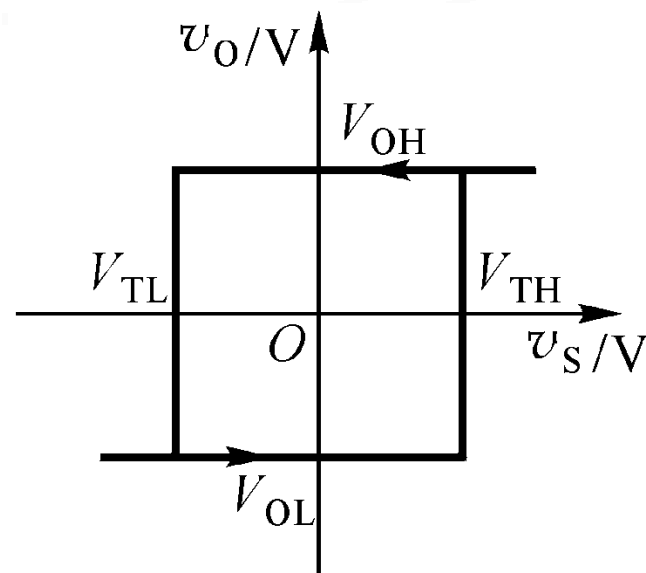
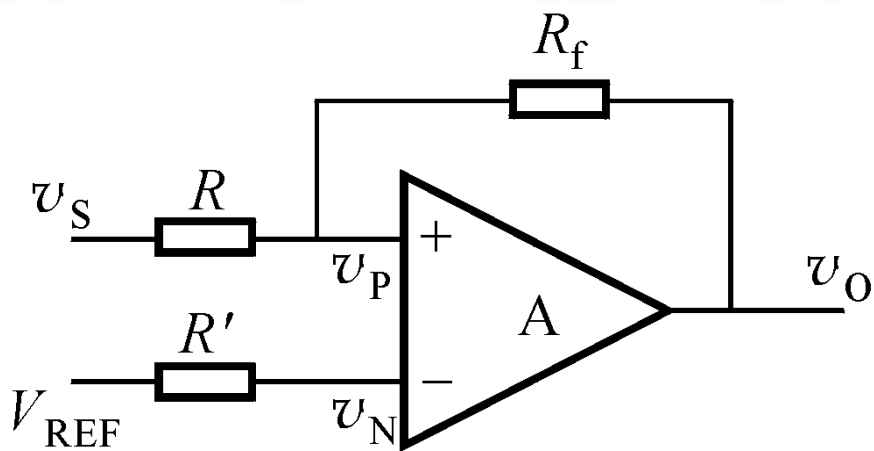


三角波变换为方波



反相滞回比较器

## 同相滞回比较器



如何求同相滞回比较器的  $V_{TH}$  和  $V_{TL}$  ?

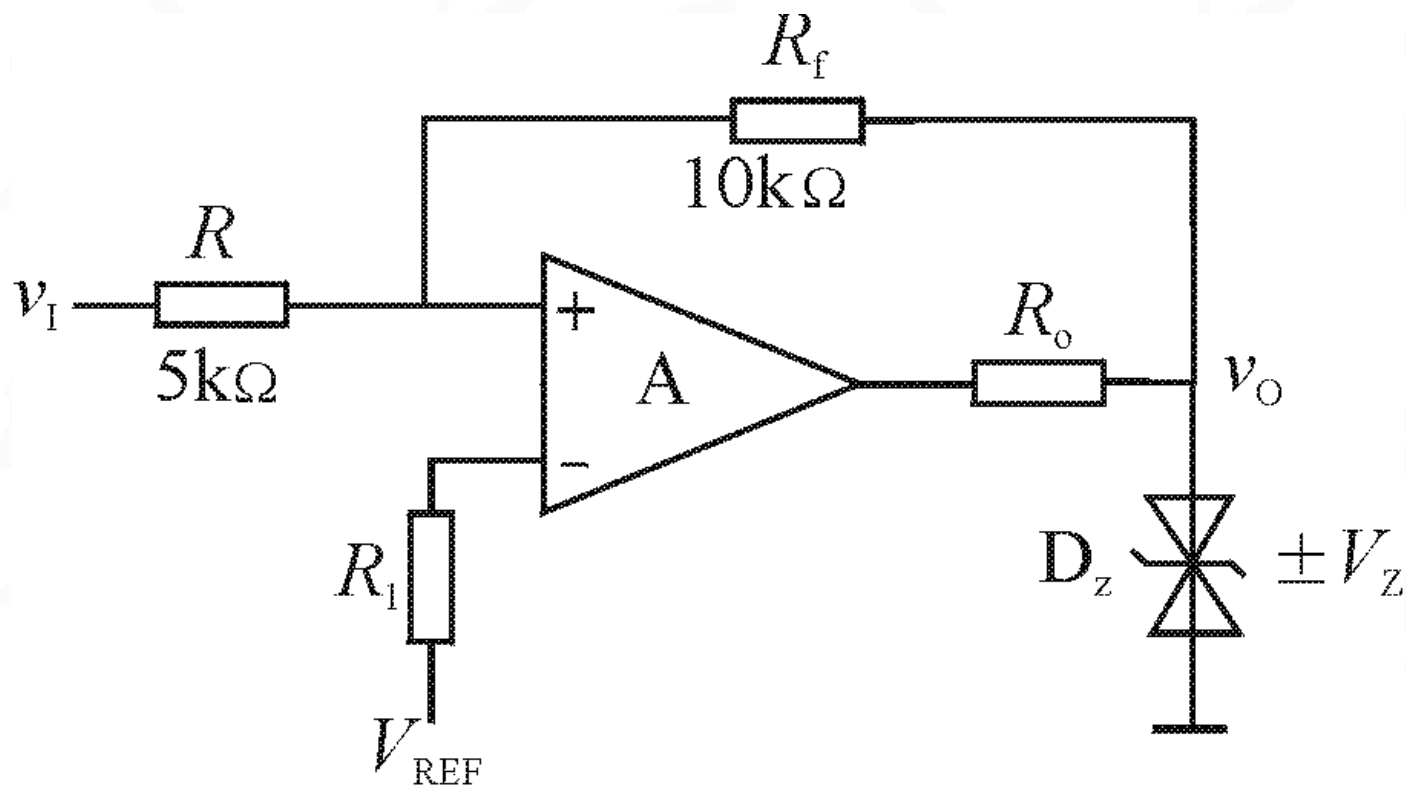
$$v_N = V_{REF} \quad v_P = \frac{R}{R + R_f} v_O + \frac{R_f}{R_f + R} v_S$$

$V_{TH}$  和  $V_{TL}$  是对应  $v_P = v_N$  (输出跳变的临界状态)

时的输入电压。

$$V_{TH(TL)} = \frac{R + R_f}{R_f} V_{REF} - \frac{R}{R_f} V_{OL(OH)}$$

## ➤ 比较器的输出限幅

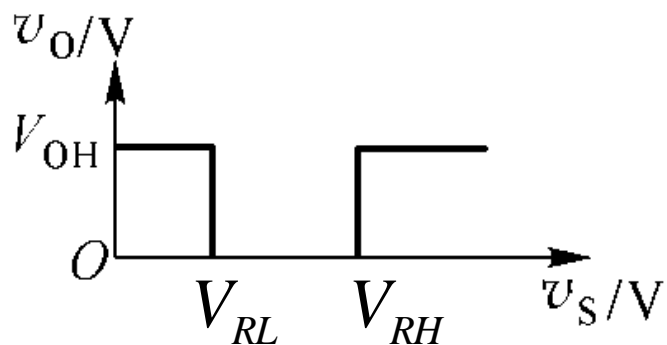


$$V_{OH} = +V_Z$$

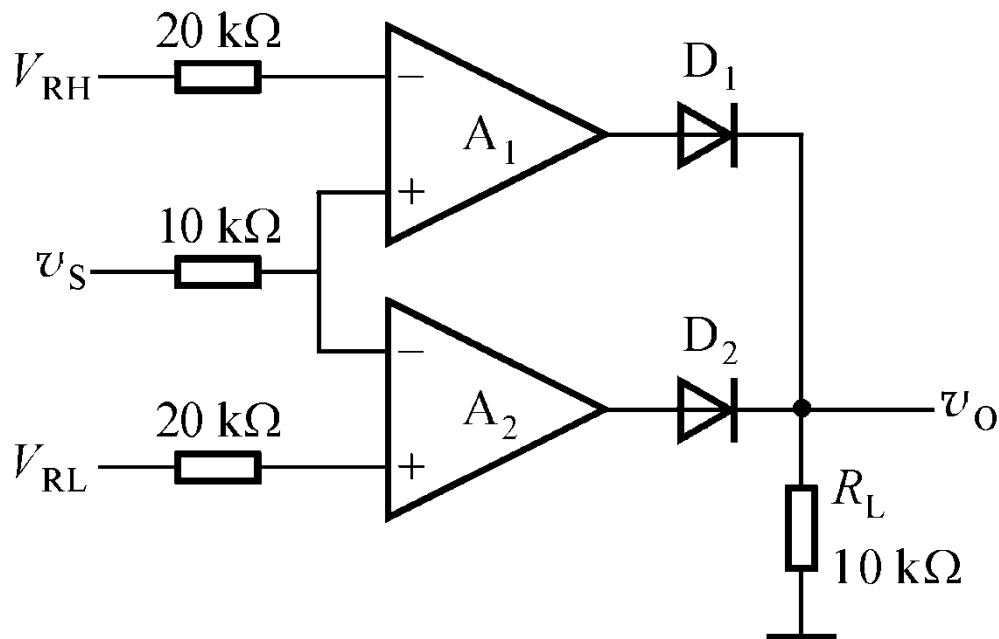
$$V_{OL} = -V_Z$$

### 3、窗口比较器和三态比较器

#### ➤ 窗口比较器

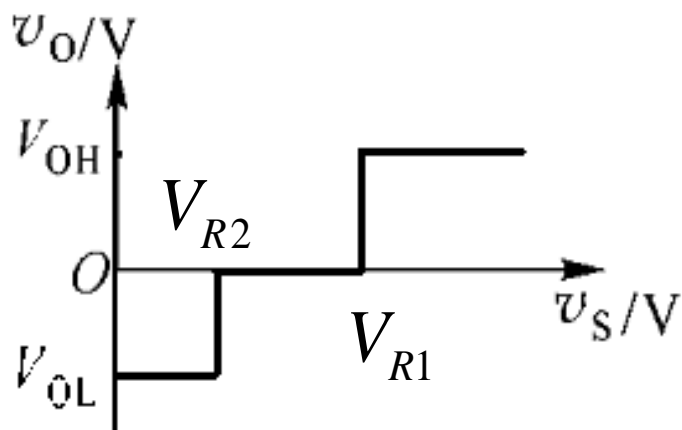
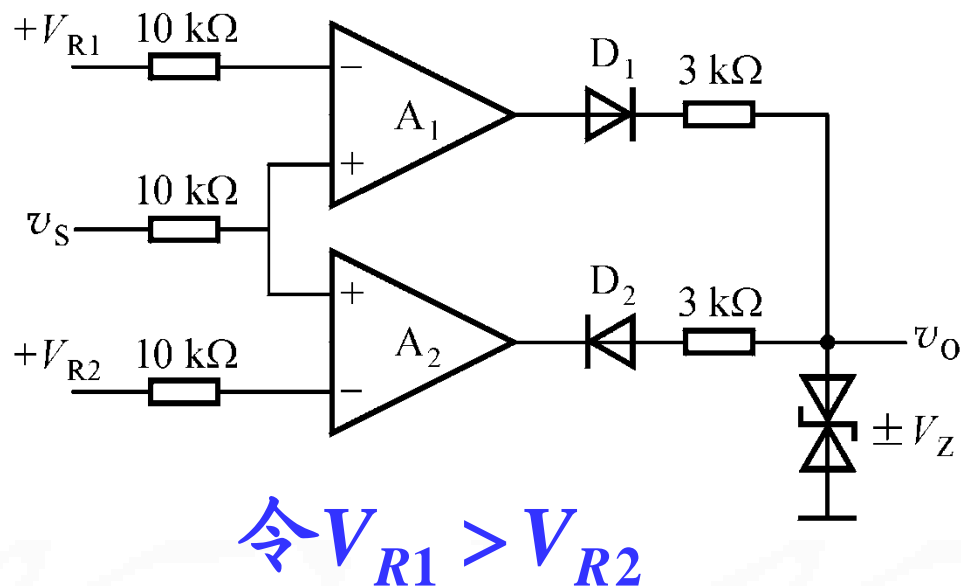


电压传输特性



- ✧ 当  $v_S > V_{RH}$  时,  $v_{O1} = V_{OH}$ ,  $v_{O2} = V_{OL}$ ,  $v_O = V_{OH}$ ;
- ✧ 当  $v_S < V_{RL}$  时,  $v_{O1} = V_{OL}$ ,  $v_{O2} = V_{OH}$ ,  $v_O = V_{OH}$ ;
- ✧ 当  $V_{RL} < v_S < V_{RH}$  时,  $v_{O1} = V_{OL}$ ,  $v_{O2} = V_{OL}$ ,  $v_O = 0$ 。

## 三态比较器



$v_S < V_{R2}$  时

$$v_{O1} = v_{O2} = V_{OL}$$

$D_2$  导通,  $D_1$  截止

$$v_O = V_{OL}$$

$v_S > V_{R1}$  时

$$v_{O1} = v_{O2} = V_{OH}$$

$D_2$  截止,  $D_1$  导通

$$v_O = V_{OH}$$

$V_{R2} < v_S < V_{R1}$  时

$$v_{O1} = V_{OL}, v_{O2} = V_{OH}$$

$D_2$  截止,  $D_1$  截止

$$v_O = 0$$

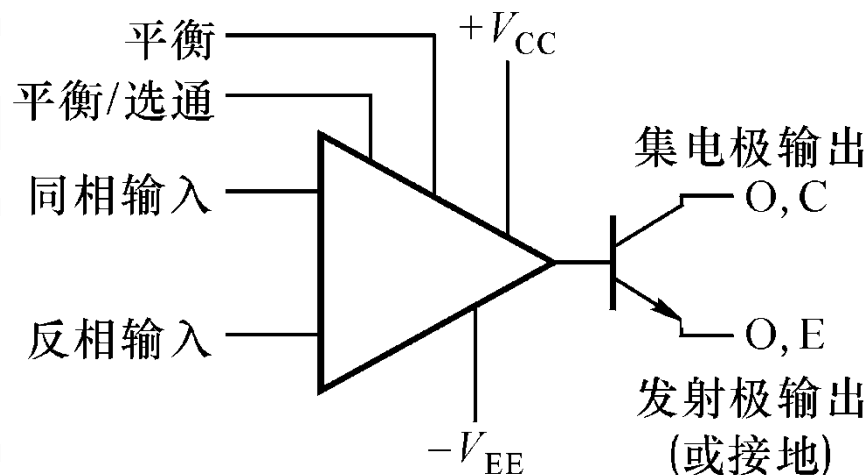


## 二、集成电压比较器（自学）

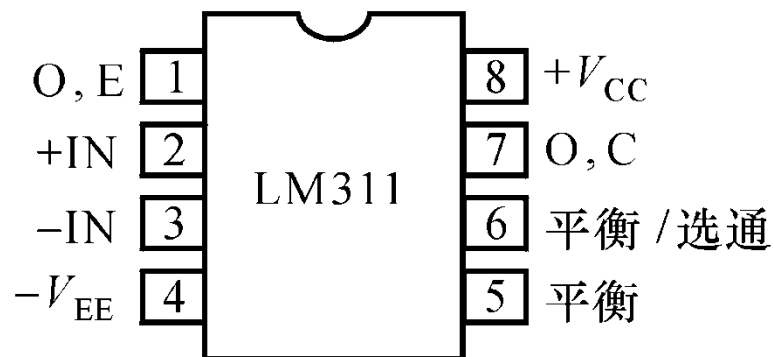
前面介绍的各种电压比较器都是由通用型运放构成的，工作速度较低，响应时间较长，且输出电平与数字电路TTL器件不兼容。集成电压比较器实质上是一种模拟电路与数字电路之间的接口电路。

- ✧ 输入级与通用型运放相同，输出级与数字电路要求一致，多为集电极开路(OC)或发射极开路(OE)。
- ✧ 频带较宽，无需相位补偿。
- ✧ 响应时间短，翻转速度较**快**。
- ✧ 常带有可控制的**选通端**，当需要结果的时候，输出被选通；不需要的时候，比较器与外电路隔离。

## ➤ LM311型集成比较器



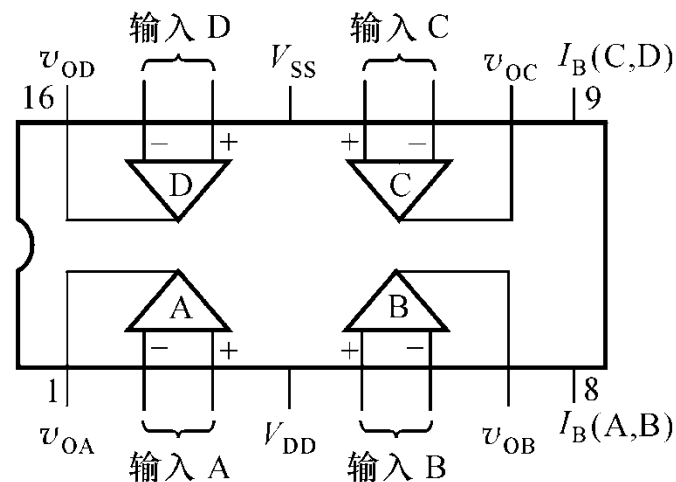
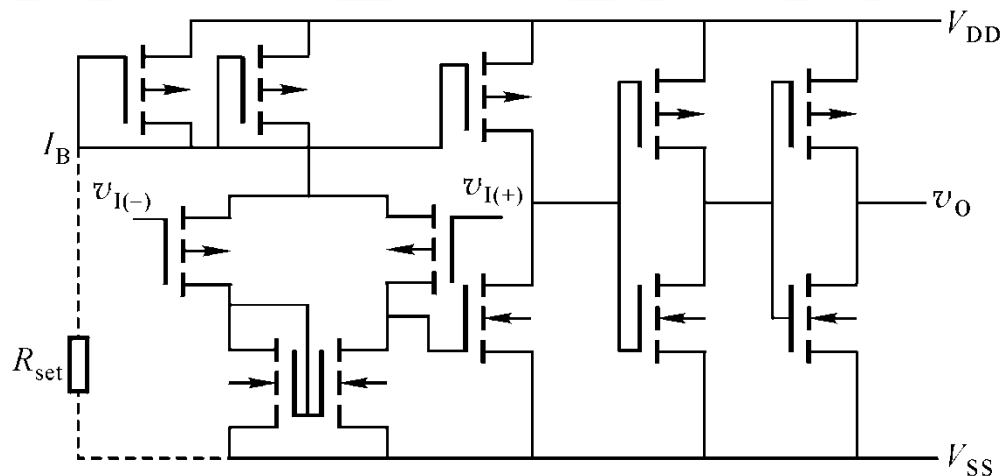
功能框图



引脚图

- ✧ 电源可以单组+5V，也可±15V，适应范围宽。
- ✧ 输出与TTL或CMOS电平兼容；可以直接驱动多种负载（灯泡、继电器等）。
- ✧ 输入和输出都可以与系统地隔离，输出可以驱动以地为参考或以正、负电源为参考的负载。

## ➤ MC14574 (CMOS) 集成四电压比较器



功能框图

引脚图

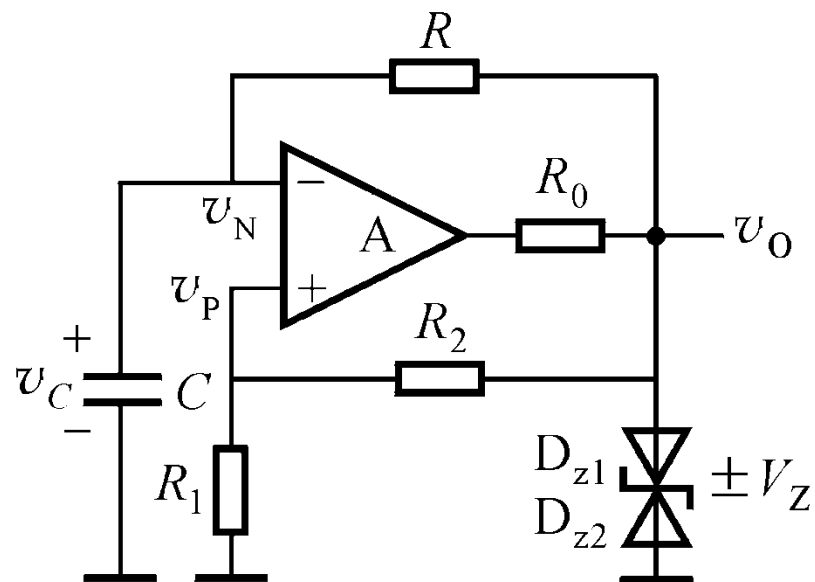
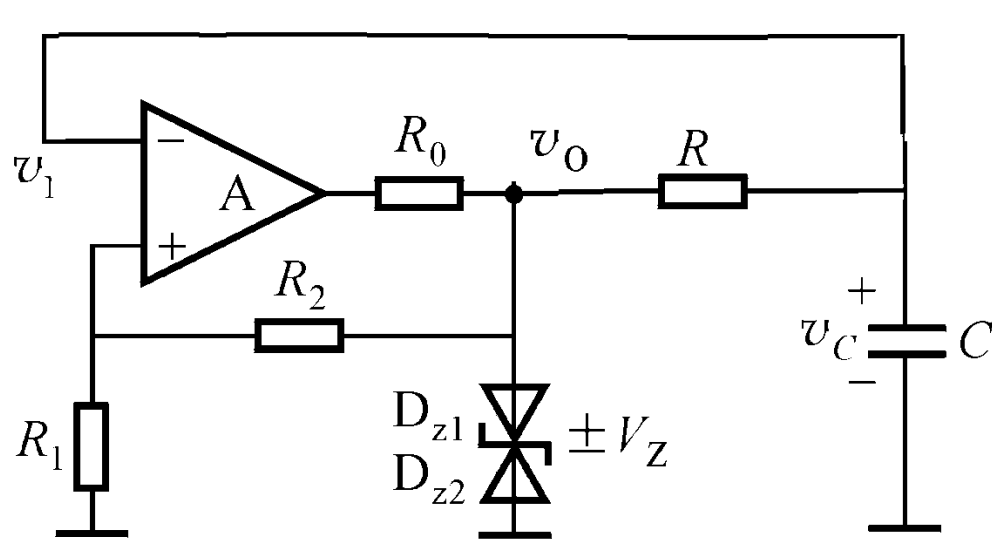
- ✧ 与CMOS电路兼容，功耗低，输入阻抗高。
- ✧ 电源电压范围宽：5~15V或 $\pm(2.5\sim7.5)V$ 。
- ✧ 转换速率快。





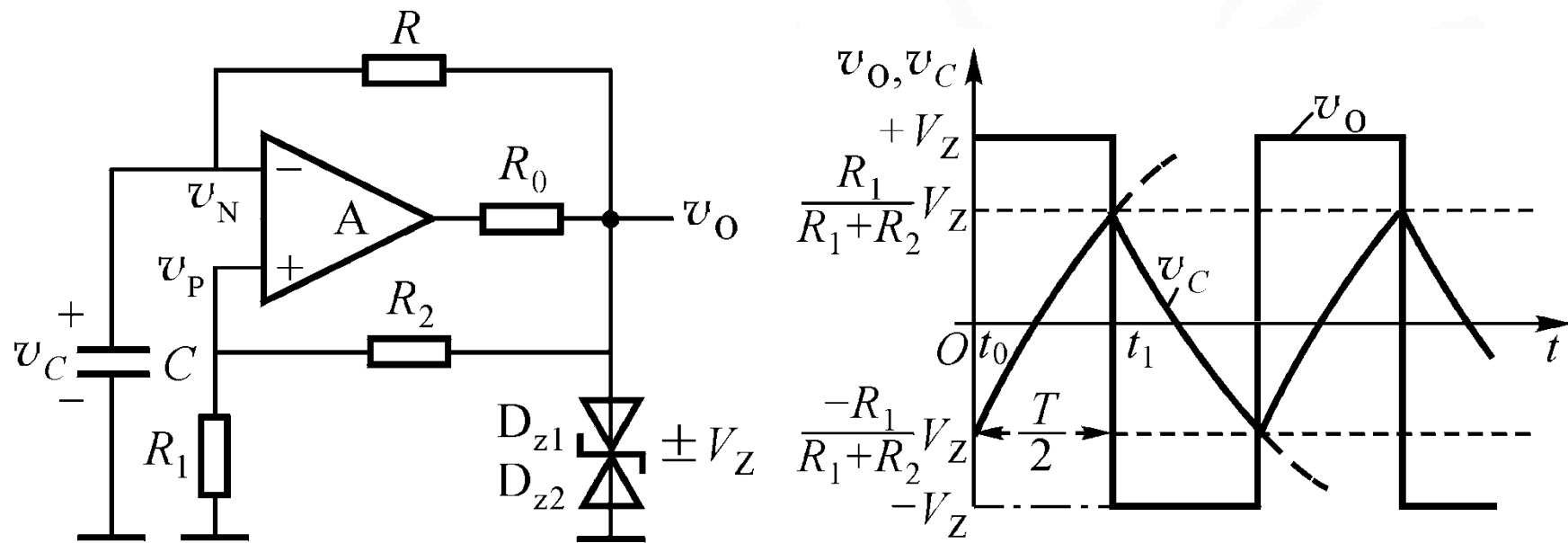
### 三、方波与三角波发生器

#### ➤ 基本电路



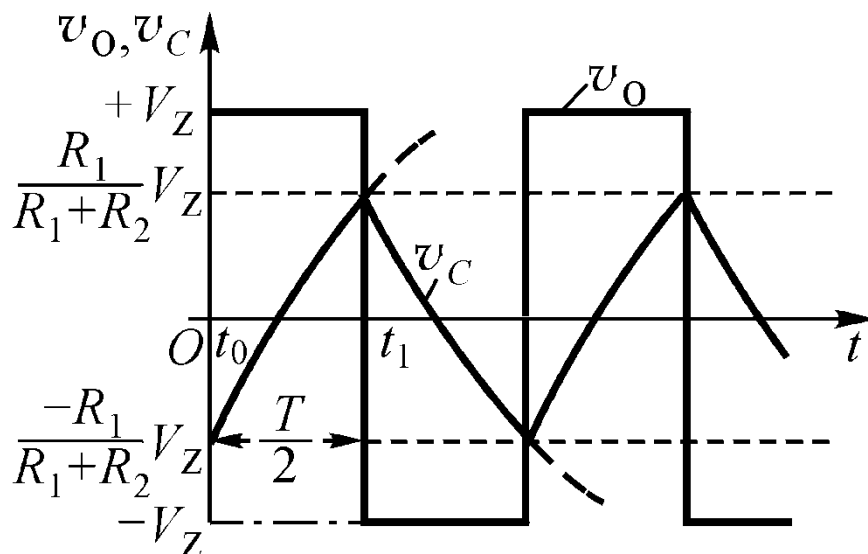
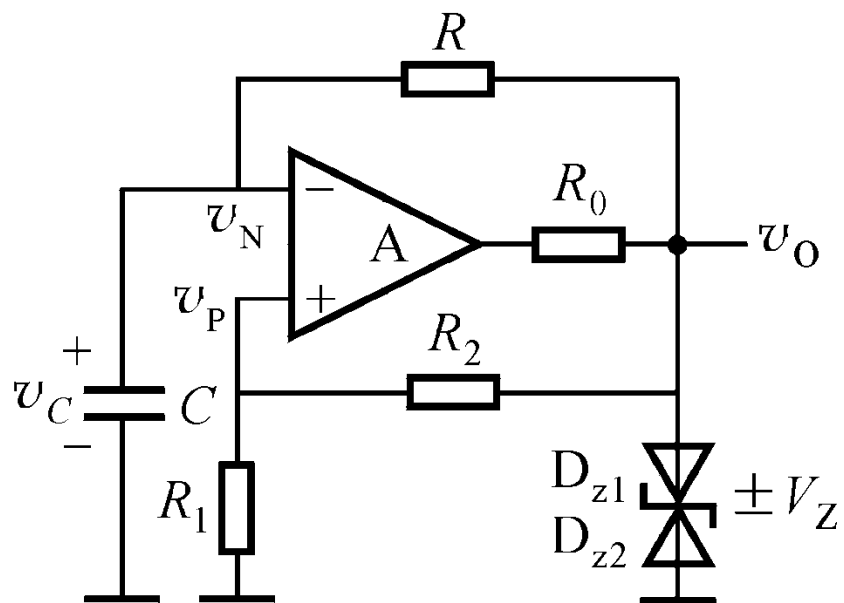
反相滞回比较器    RC充放电路

## 工作原理



当合上电源瞬间， $v_C = 0$ ，假设  $v_O = +V_Z$ 。

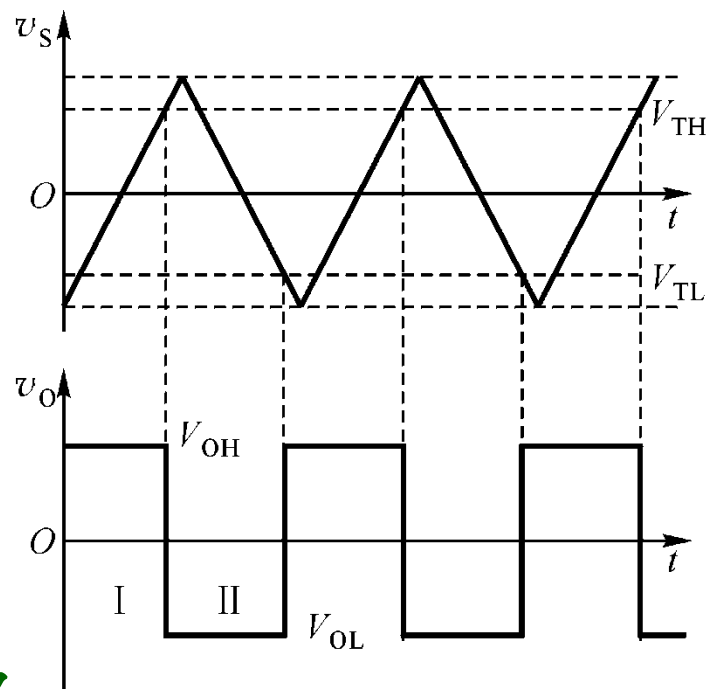
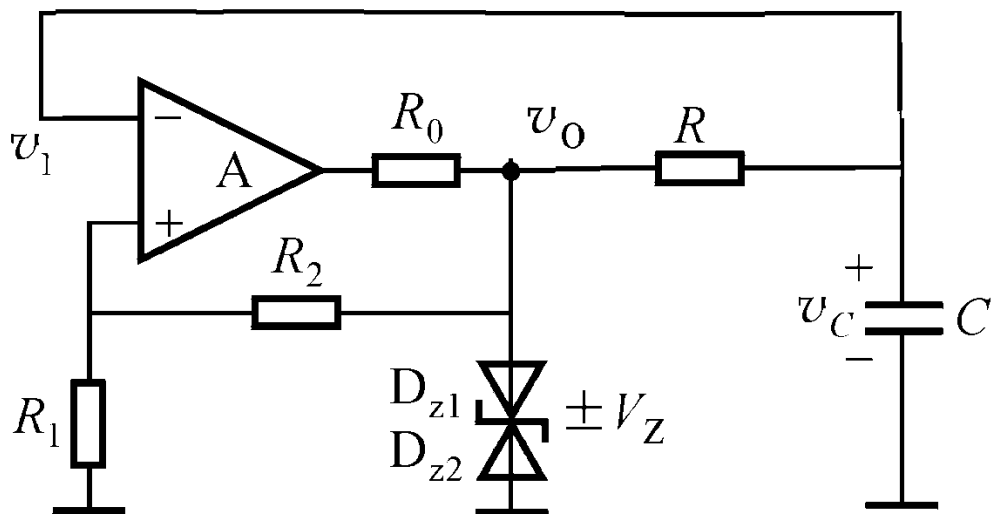
当  $v_O = +V_Z$  时，输出电压  $v_O$  通过  $R$  对电容  $C$  充电，电容电压  $v_C$  以指数规律上升。当升至反相滞回比较器的上限触发电平  $V_{TH}$  时 ( $V_{TH} = V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ )，输出状态翻转为低电平，即  $v_O = -V_Z$ 。



当  $v_O = -V_Z$  时，电容  $C$  放电， $v_C$  下降。当降至下限触发电平  $V_{TL}$  时 ( $V_{TL} = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ )，输出状态翻转为高电平，即  $v_O = +V_Z$ 。

周而复始，得到方波和三角波。

## ➤ 自激振荡原理

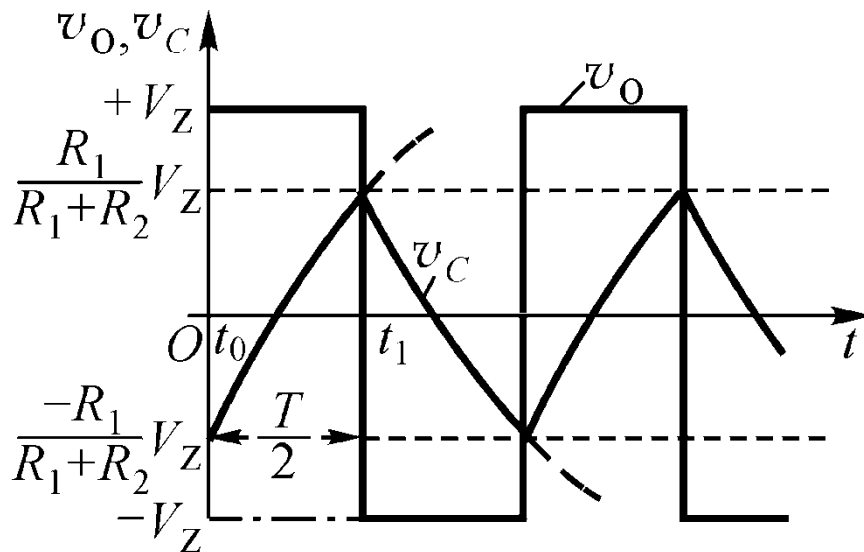


反相滞回比较器      RC充放电电路

- ✧ 滞回比较器：三角波 → 方波
- ✧ RC积分电路：方波 → 三角波
- ✧ 两者相连：自动产生方波和三角波

## ➤ 振荡频率 $f$

利用一阶RC电路电容电压的过渡过程计算  
(三要素法) 可求振荡  
周期或频率。



$$v_C(t) = v_C(\infty) + [v_C(0^+) - v_C(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$v_C(0^+) = -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_C(\infty) = +V_Z \quad \tau = RC$$

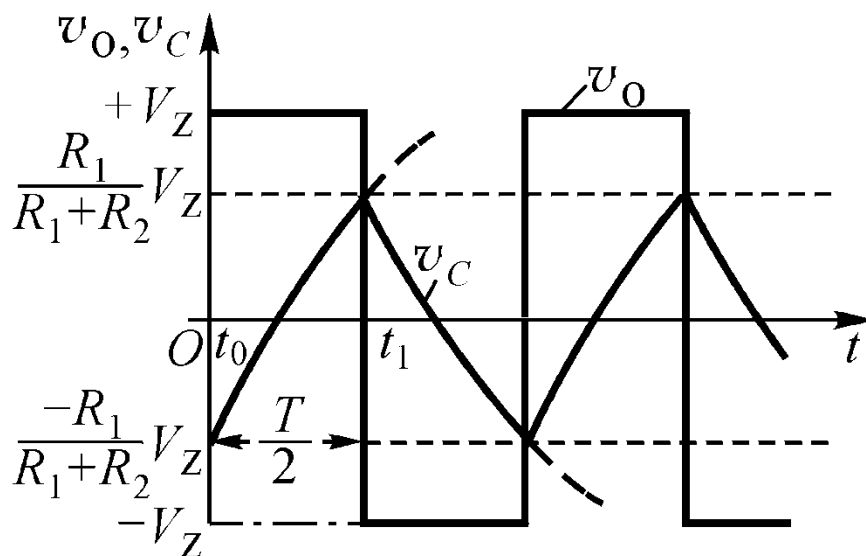
$$\text{当 } t = \frac{T}{2} \text{ 时, } v_C(t) = v_C\left(\frac{T}{2}\right) = +V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_Z + \left[ -V_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_Z \right] e^{-T/2RC}$$

$$T = 2RC \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right)}$$



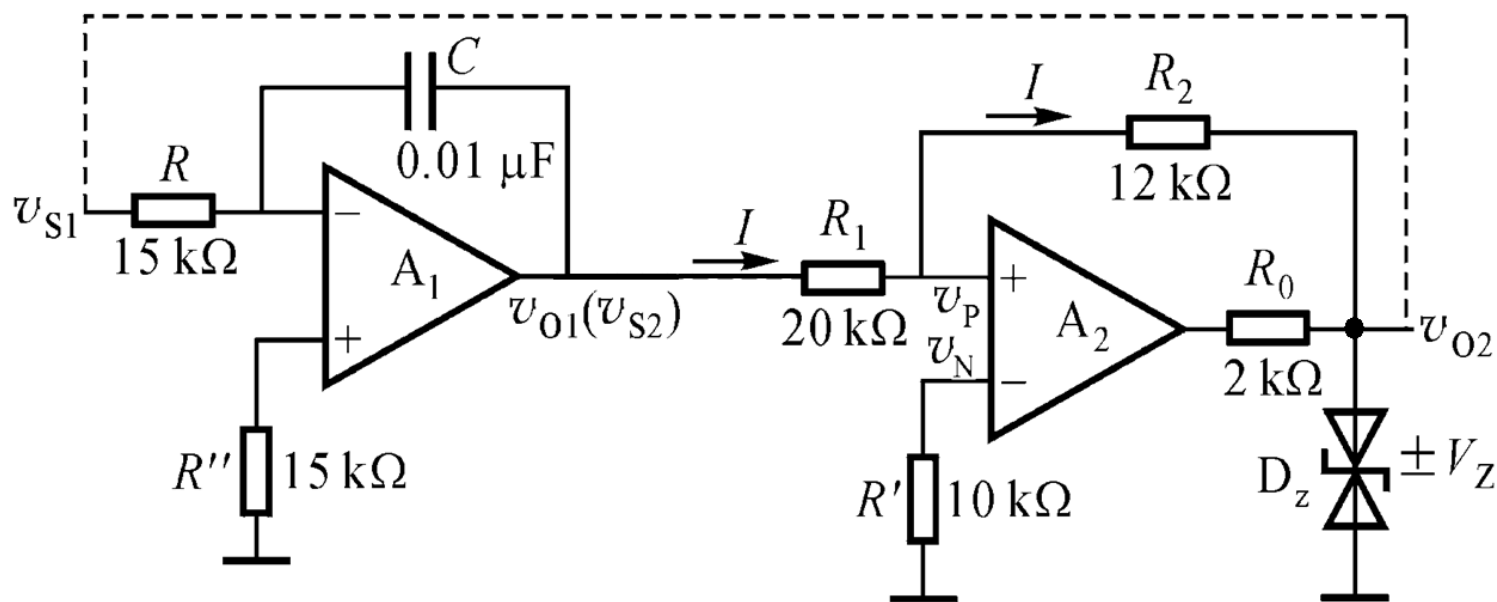
占空比 $q$ :

$$q = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T}$$

显然， $T_{on}$ 与充电时间常数有关， $T_{off}$ 与放电时间常数有关。此处 $q=0.5$ 。

## 改进电路：改善三角波的线性度

该电路的三角波线性度不好是主要的缺点，用运放组成的积分电路代替RC电路能得到线性良好的三角波。



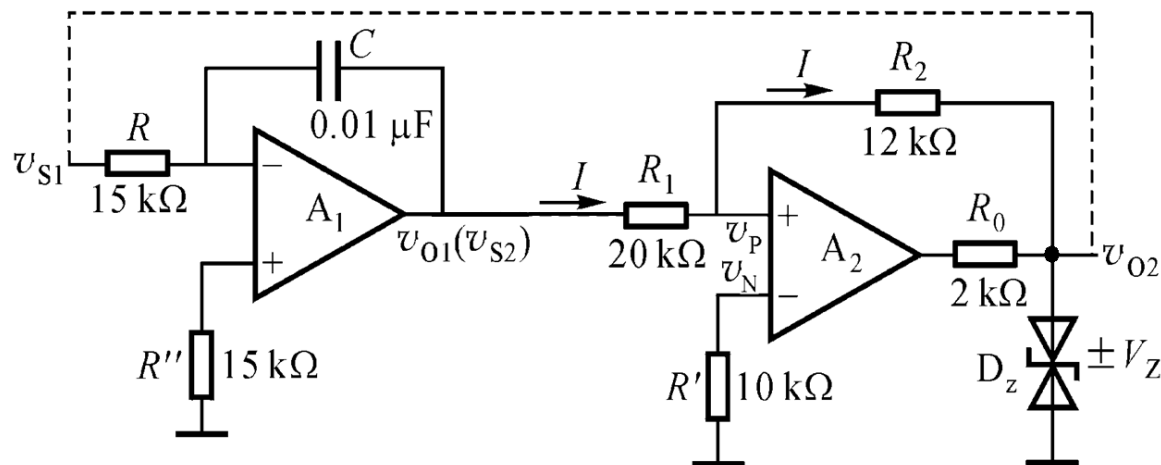
积分器

同相滞回比较器

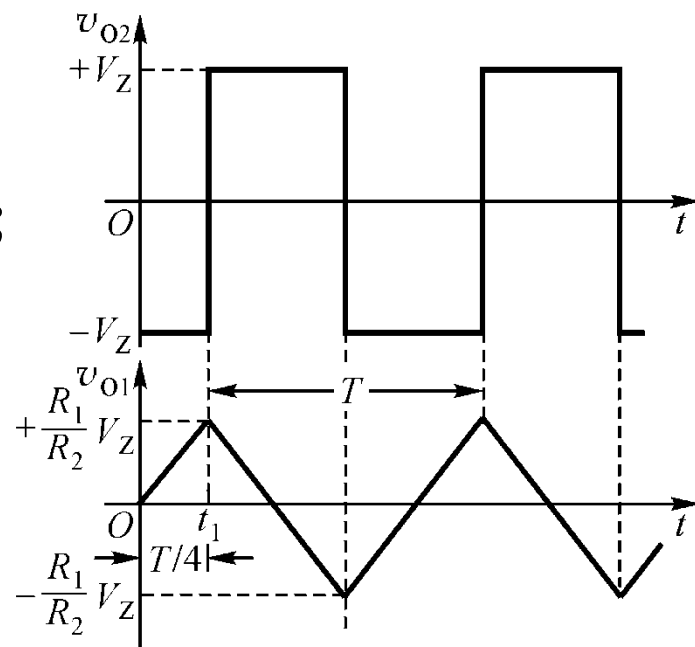
为什么要选择同相输入的滞回比较器？

## ☆ 振荡原理

电源合上时设  
 $v_{O2} = V_{OH} = +V_Z$ 。



积分器 **负方向积分**， $v_{O1}$  下降，当  $v_{O1}$  下降至  $V_{TL}$  时，比较器翻转成低电平， $v_{O2} = V_{OL} = -V_Z$ ；积分器又作 **正方向积分**， $v_{O1}$  线性上升，当升至  $V_{TH}$  时，比较器翻转为高电平， $v_{O2} = V_{OH} = +V_Z$ 。所以， $v_{O1}$  输出为线性优良的三角波， $v_{O2}$  输出方波。



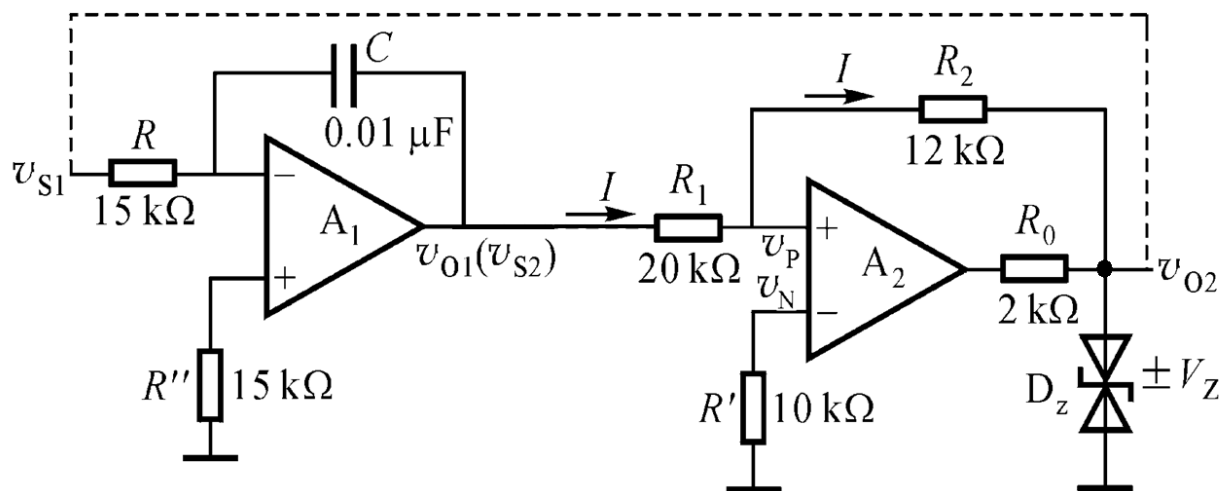
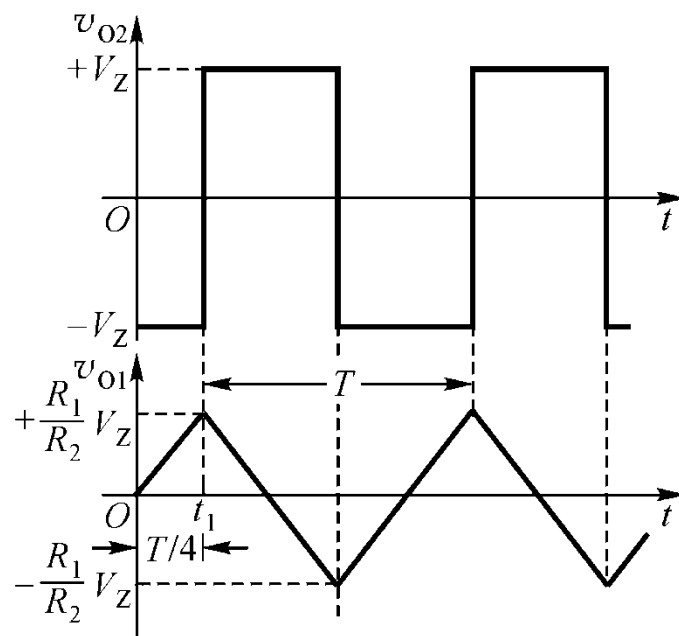


## ☆ 三角波的幅度和周期

根据滞回比较器的**临界转换条件**来求。当 $v_P = v_N$ 时，流过电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 的电流相等。

$$V_{om1} = V_{TH} = I \cdot R_1 = \frac{V_Z}{R_2} \cdot R_1$$

$$-V_{om1} = V_{TL} = -I \cdot R_1 = -\frac{V_Z}{R_2} \cdot R_1$$





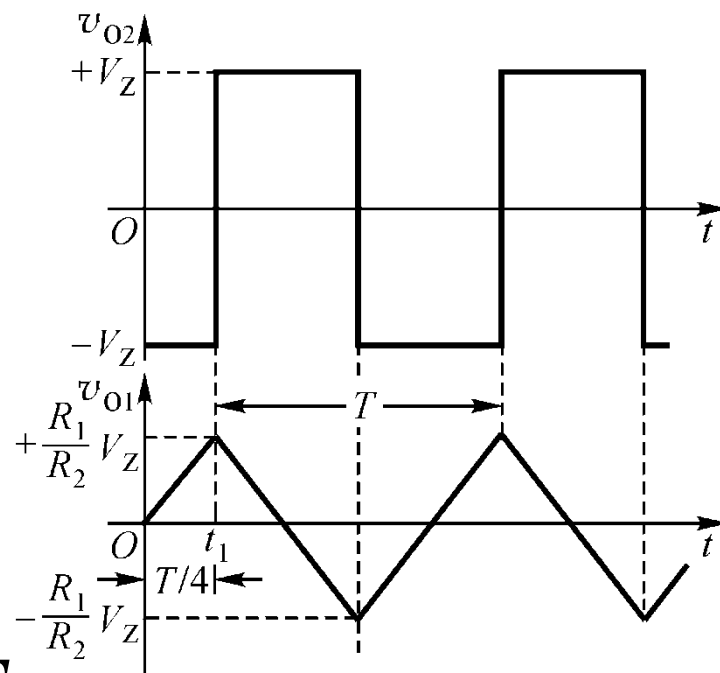
$$V_{om1} = V_{TH} = I \cdot R_1 = \frac{V_Z}{R_2} \cdot R_1$$

$$-V_{om1} = V_{TL} = -I \cdot R_1 = -\frac{V_Z}{R_2} \cdot R_1$$

三角波的周期可通过  
积分器的运算关系式来求。

$$V_{om1} = -\frac{1}{RC} \int_0^{\frac{T}{4}} (-V_Z) dt = \frac{V_Z}{RC} \cdot \frac{T}{4}$$

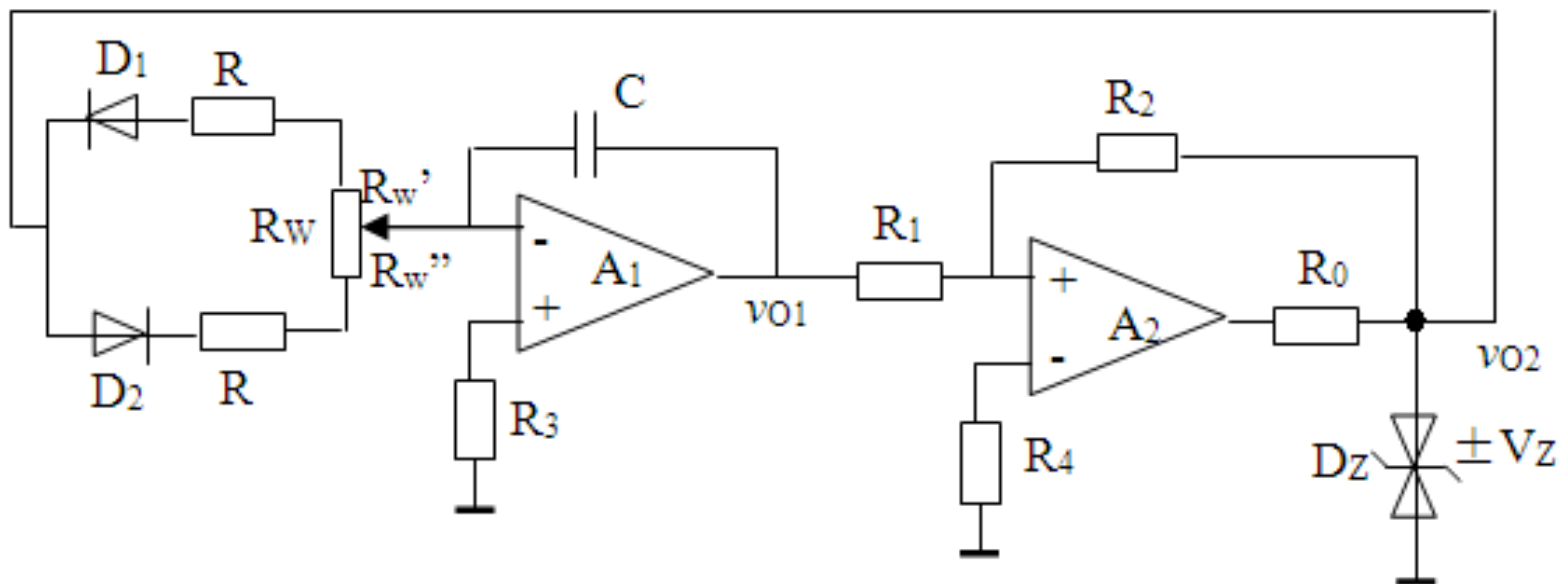
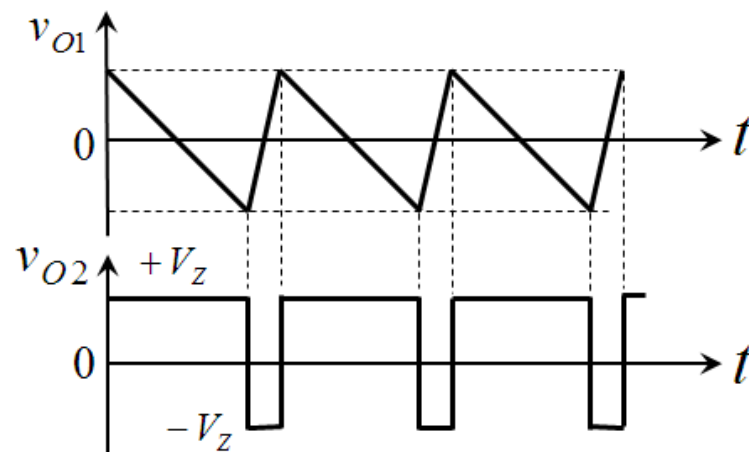
$$T = 4RC \frac{V_{om1}}{V_Z} = 4RC \frac{R_1}{R_2}$$





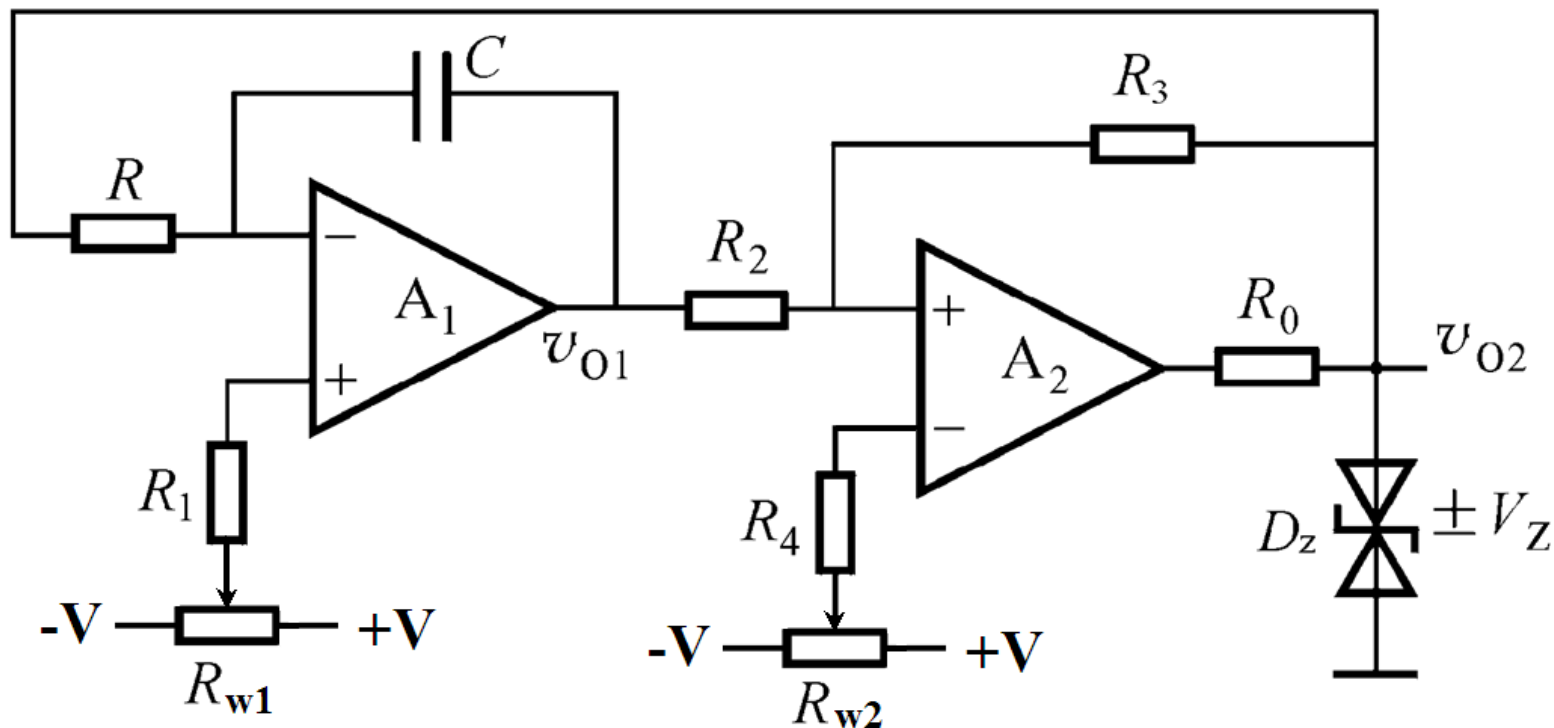
## ➤ 进一步改进：产生锯齿波和矩形波

这只要将积分器的正向和负向积分回路分开，并调节正负方向积分的时间常数即可。



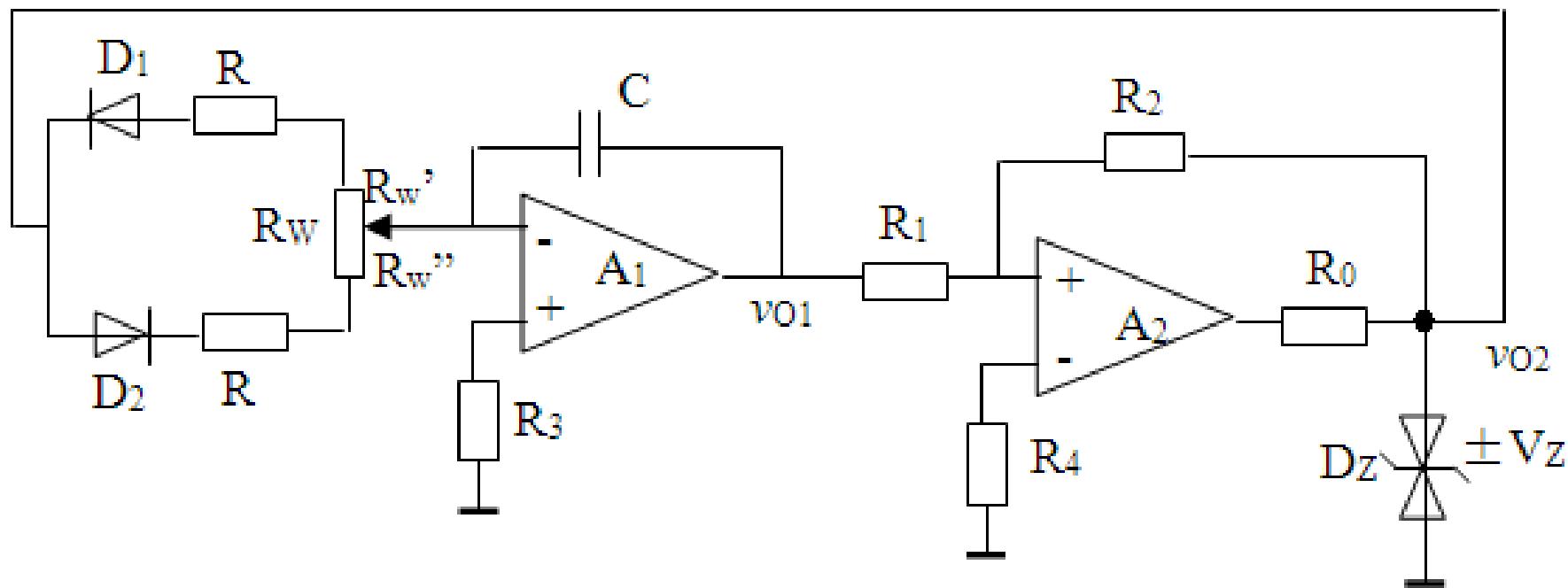


另一种产生锯齿波和矩形波的常用方法：

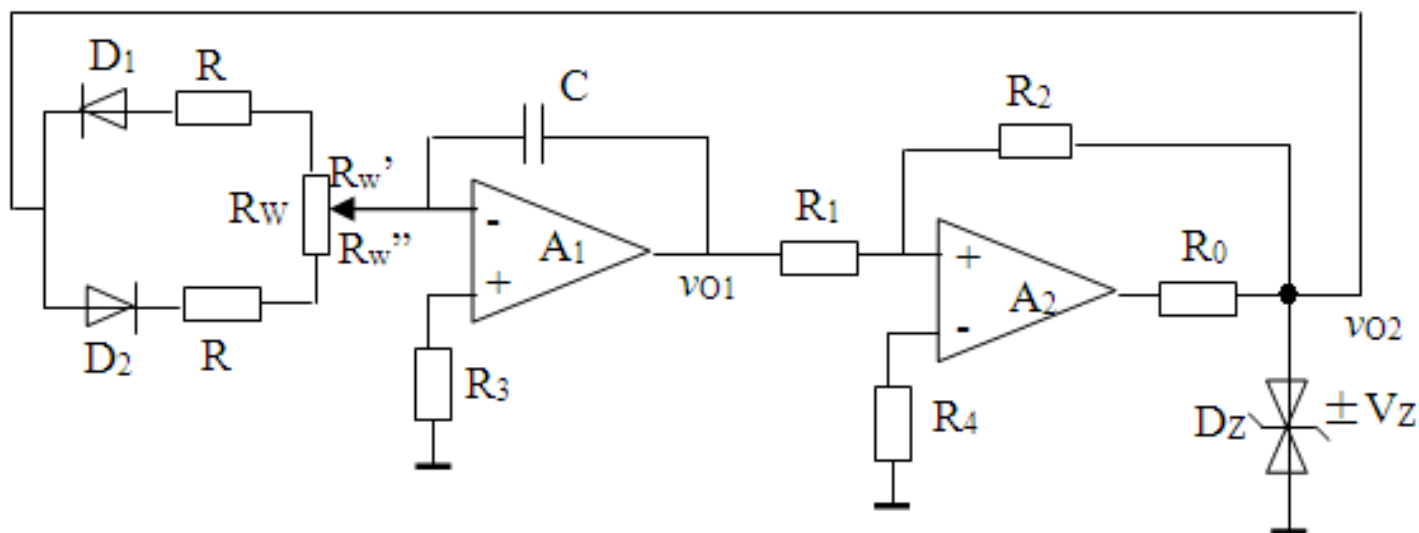


# 【例1】

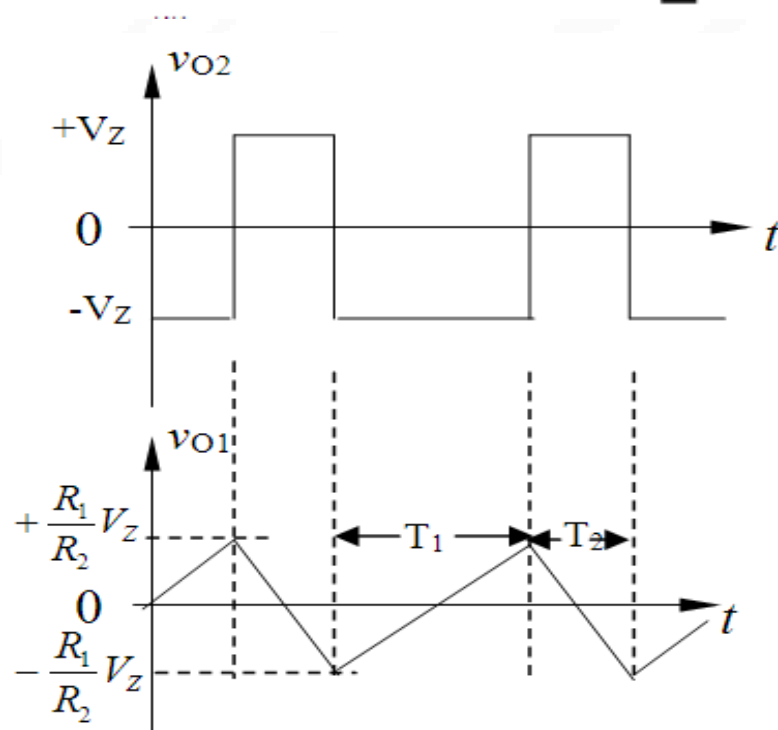
图示电路中，设 $R_w' > R_w''$ ，试画出 $v_{O1}$ 、 $v_{O2}$ 波形，并推导周期 $T$ 和占空比 $q$ 的表达式。



【解】



- 当  $v_{O2} = +V_Z$ :  $D_2$  导通, 因  $R_{w''}$  小(充电电流大), 所以反向积分过程快。
- 当  $v_{O2} = -V_Z$ :  $D_1$  导通, 因  $R_{w'}$  大(放电电流小), 所以正向积分过程慢。



三角波幅度为：

$$\frac{V_{om}}{R_1} = \frac{\pm V_Z}{R_2} \quad V_{om} = \pm \frac{R_1}{R_2} V_Z$$

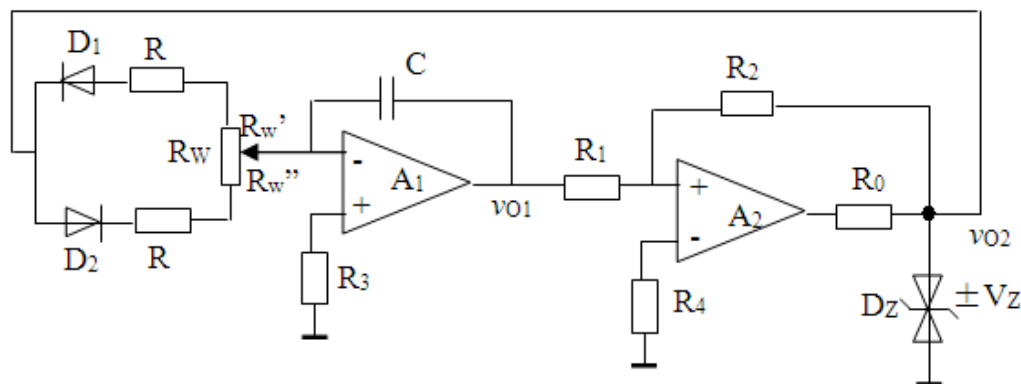
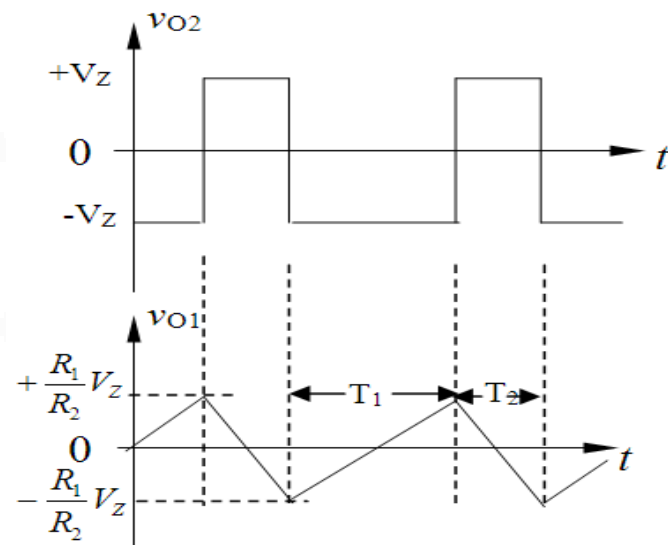
求周期和占空比：

$$+\frac{R_1}{R_2} V_Z = -\frac{-V_Z}{(R + R'_w)C} \cdot \frac{T_1}{2}$$

$$T_1 = 2(R + R'_w)C \frac{R_1}{R_2}$$

$$-\frac{R_1}{R_2} V_Z = -\frac{+V_Z}{(R + R''_w)C} \cdot \frac{T_2}{2}$$

$$T_2 = 2(R + R''_w)C \frac{R_1}{R_2}$$



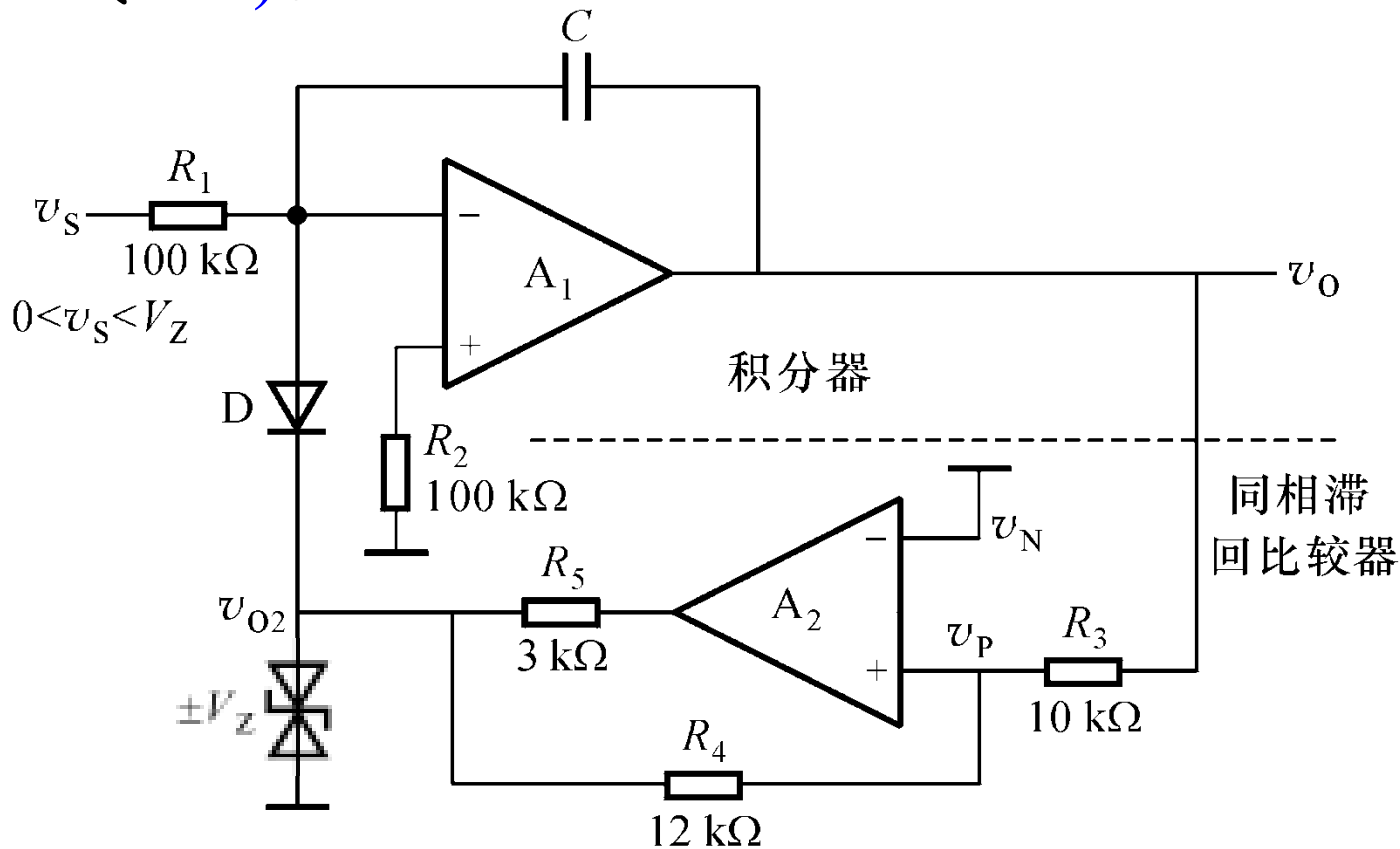
$$T = T_1 + T_2 = 2(2R + R_w)C \frac{R_1}{R_2}$$

$$q = \frac{T_2}{T} = \frac{R + R''_w}{2R + R_w}$$



## 4.6 压控振荡器 (自学)

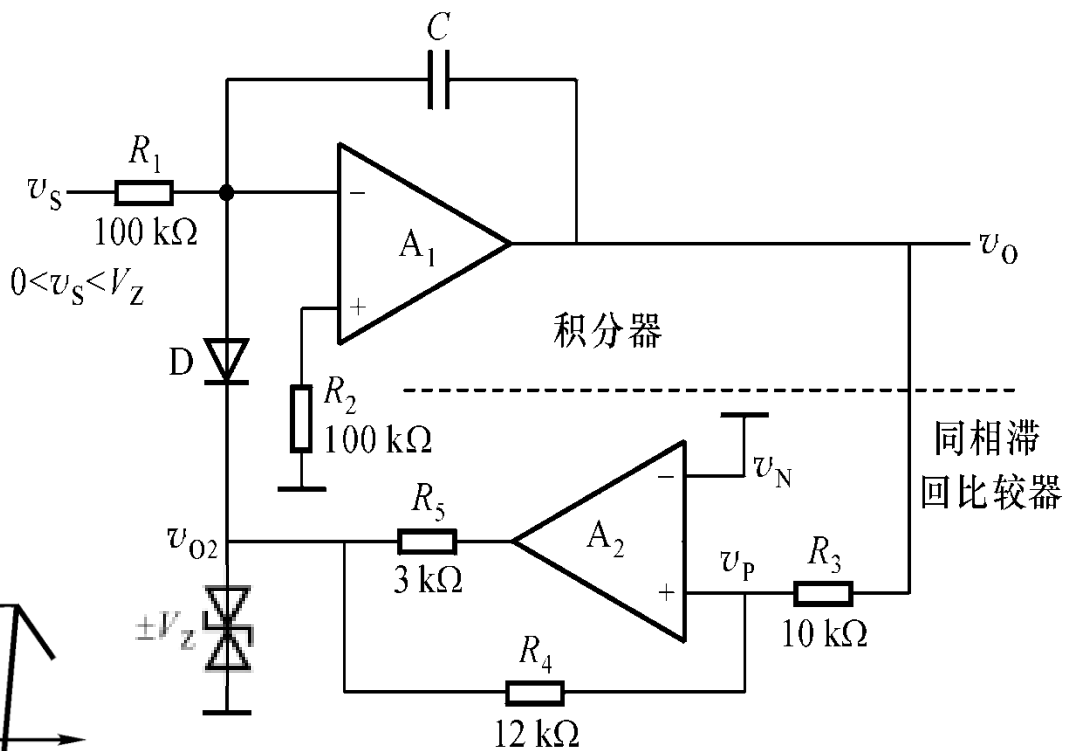
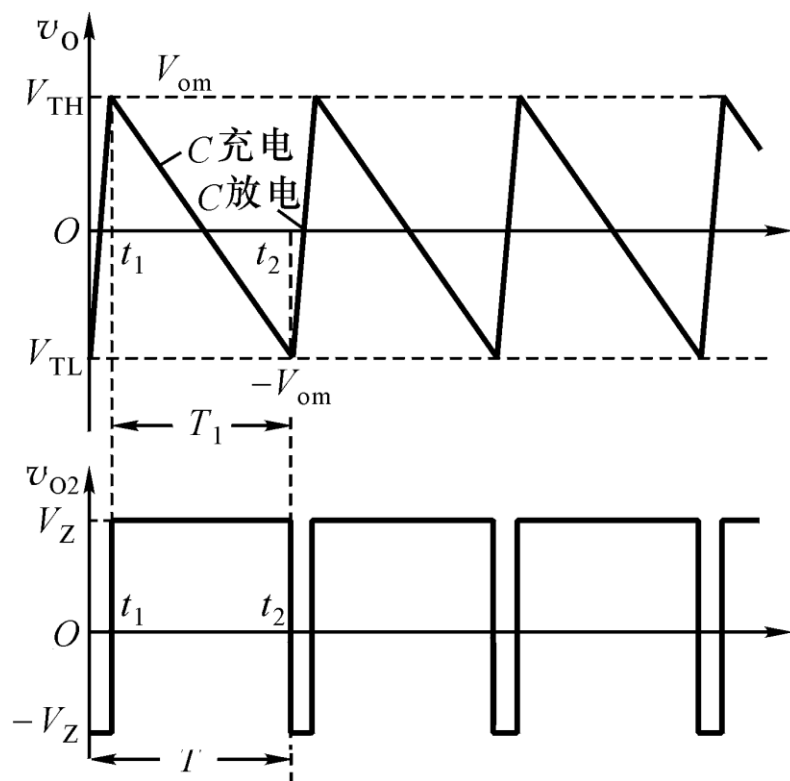
在一些使用场合，要求电路的振荡频率与控制电压成比例，即电压控制振荡频率，称为压控振荡器 (**VCO**或**V/F**)。

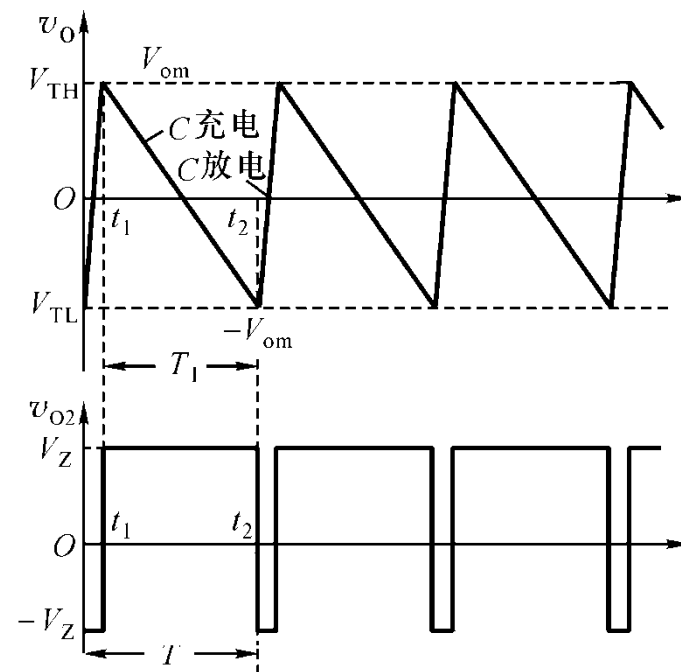
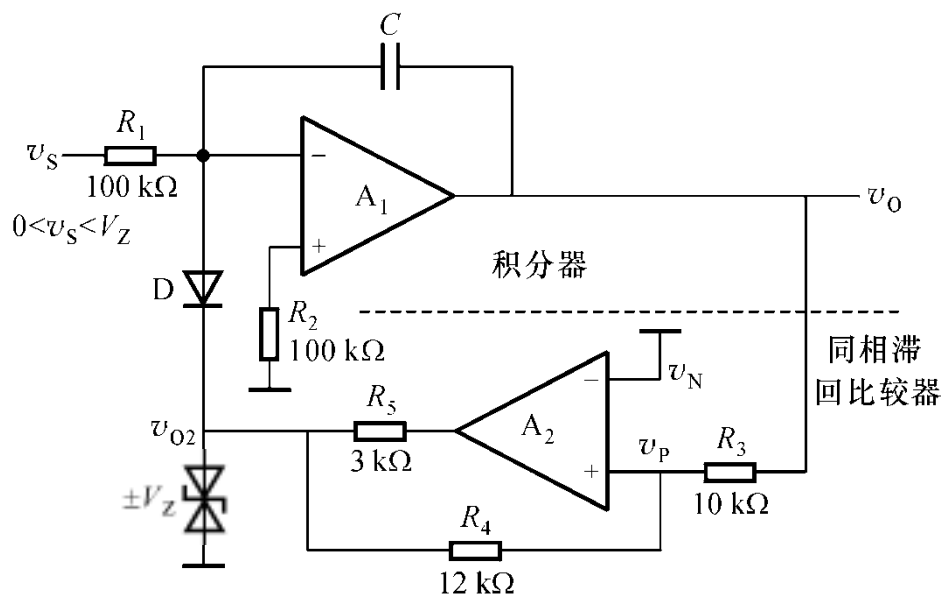






# ✧ 工作原理:





从波形图可知，反向积分时间长，而放电时间很短，振荡周期由反向积分时间决定，所以振荡周期：

$$2V_{om} = \frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} V_S dt = \frac{V_S}{R_1 C} T_1$$

$$T_1 = \frac{2R_1 R_3 C}{R_4} \cdot \frac{V_Z}{V_S}$$

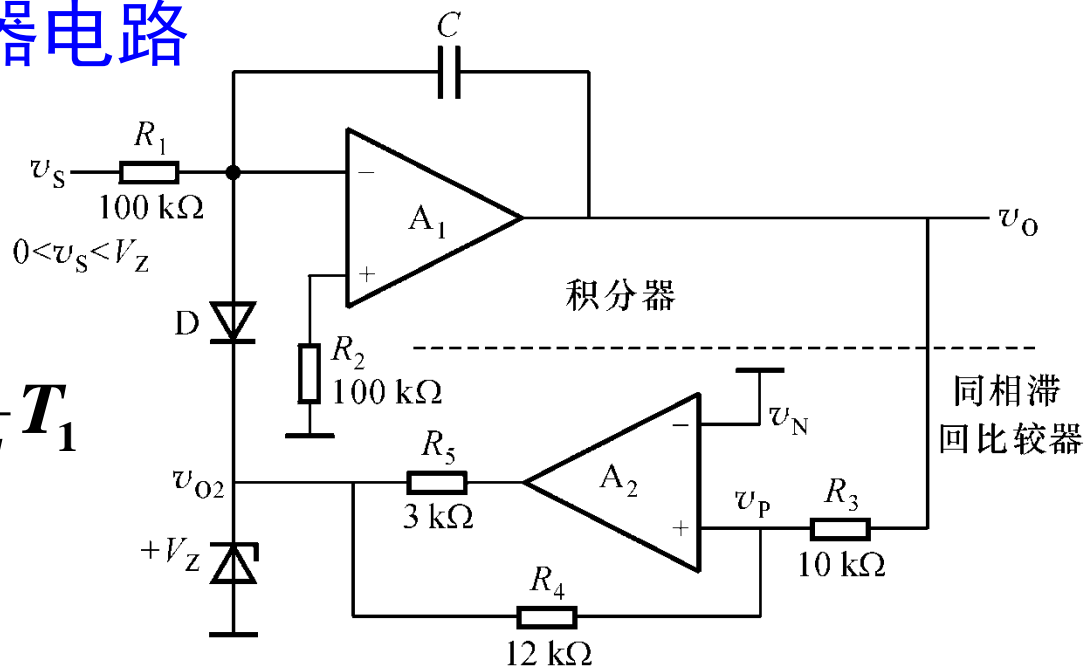
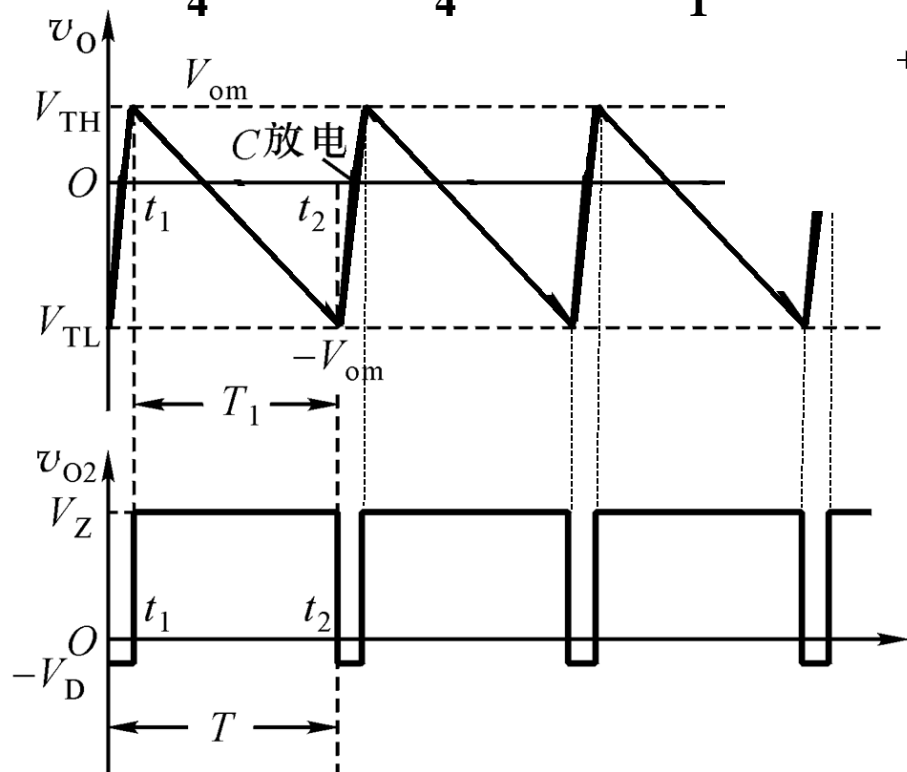
$$V_{om} = \frac{R_3}{R_4} V_Z \quad 2 \frac{R_3}{R_4} V_Z = \frac{V_S}{R_1 C} T_1$$

$$f \approx \frac{R_4}{2R_1 R_3 C} \cdot \frac{V_S}{V_Z}$$

# 教材上的压控振荡器电路

$$V_{TH} - V_{TL} = \frac{V_S}{R_1 C} T_1$$

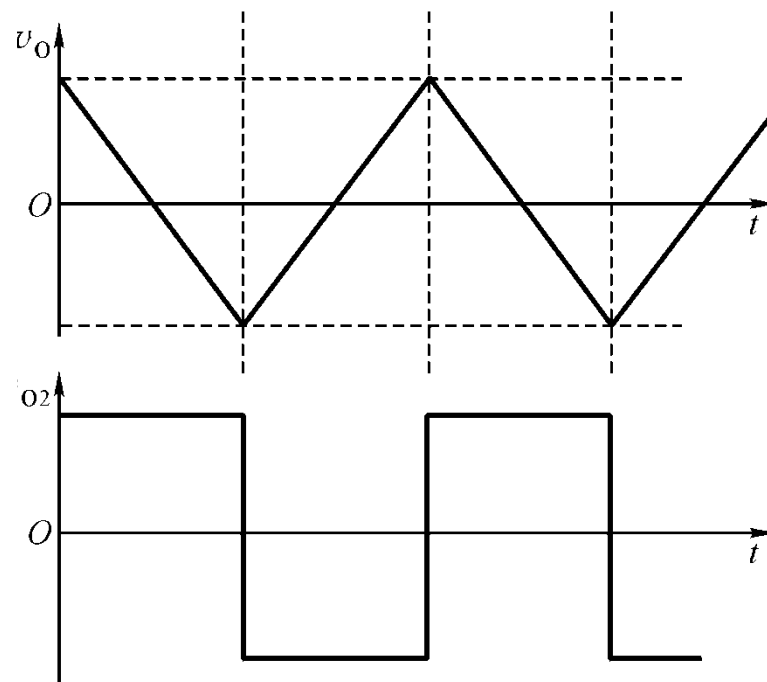
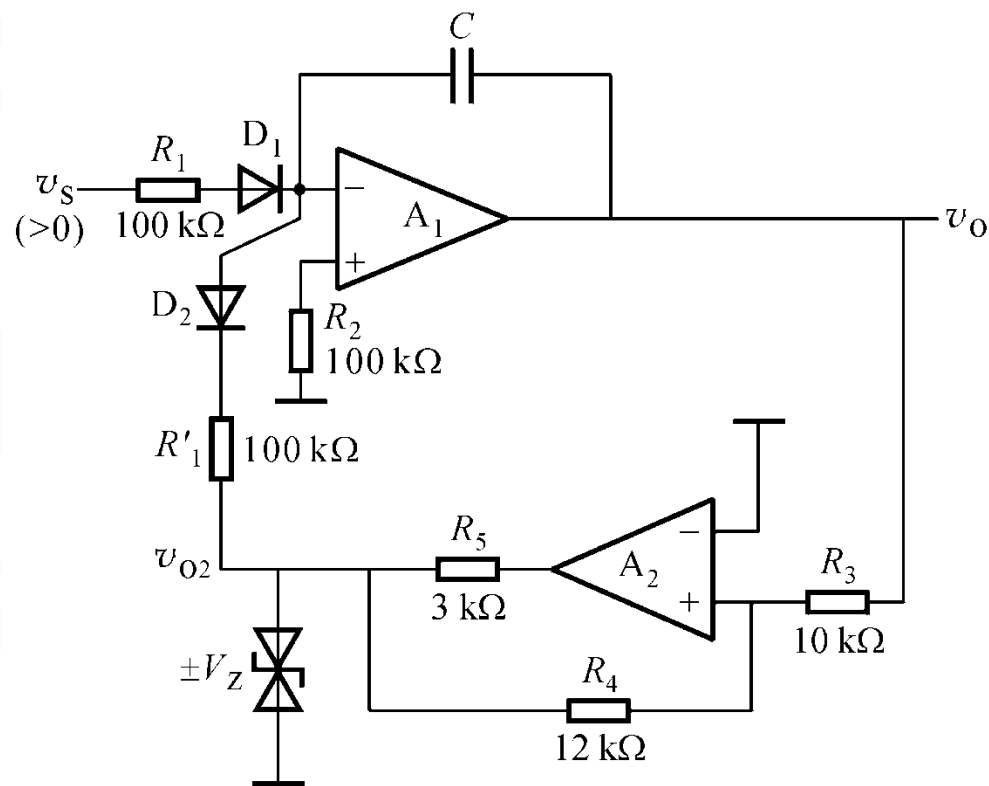
$$\frac{R_3}{R_4} V_D + \frac{R_3}{R_4} V_Z = \frac{V_S}{R_1 C} T_1$$



$$T_1 = \frac{R_1 R_3 C}{R_4} \cdot \frac{(V_Z + V_D)}{V_S}$$

$$f \approx \frac{R_4}{R_1 R_3 C} \cdot \frac{V_S}{(V_Z + V_D)}$$

## ➤ 另一种压控振荡器电路



该图增加了一只 $R'_1$ 电阻，并改用双向稳压，其它没有变，所以放电时间变长。



## 本章重点提示:

- ✧ 理解正弦振荡条件（平衡条件、起振条件、与负反馈区别）。
- ✧ 掌握RC桥式正弦波振荡电路的电路结构、工作原理、稳幅措施。
- ✧ 掌握LC正弦波振荡电路的类型、频率计算，会分析给定振荡电路能否起振。
- ✧ 了解石英晶体的特性及石英晶体振荡器的两种形式。
- ✧ 掌握电压比较器的电路型式，会分析电压传输特性；了解集成电压比较器。
- ✧ 掌握方波发生电路的工作原理，会计算相关参数。



# 作业：

题4.1

题4.8 (a)(c)(e)

题4.2

题4.9

题4.3

题4.12

题4.5

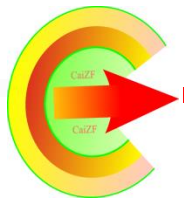
题4.3：课后答案有误

题4.8 (e)中，A2的+、-端对换。

题4.12中，R2改为15k $\Omega$ 。



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.5

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年